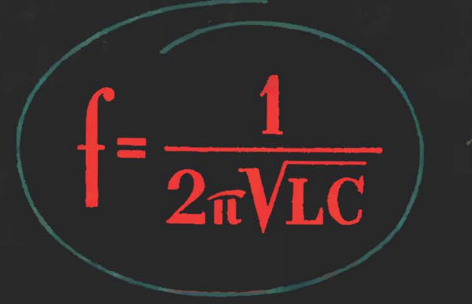
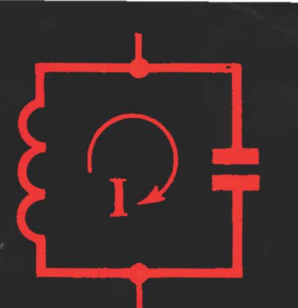




ЗАДАЧИ для РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ

С. Н. СОКОЛОВ

·ЭНЕРГИЯ·



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 716

С. Н. СОКОЛОВ

ЗАДАЧИ ДЛЯ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1970.

Оглавление

6П2.151
С59
УДК 621.37

Соколов С. Н.

С59 Задачи для радиолюбителей. М., «Энергия», 1970.

72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 716)

Предлагаются задачи по некоторым разделам радиоэлектроники. Книга содержит большое количество расчетных формул и примеров, что позволяет использовать ее в качестве своеобразного справочника. Все задачи снабжены ответами. Книга рассчитана на широкие круги радиолюбителей.

3-4-5
322-69

6П2.151

ПРЕДИСЛОВИЕ

С каждым годом совершенствуется мастерство многомиллионной армии радиолюбителей. Многие из них не только занимаются повторением готовых конструкций, но и сами разрабатывают разные схемы. При разработке новой радиоэлектронной схемы каждый конструктор в той или иной мере сталкивается с различными расчетами.

По замыслу автора предлагаемая книга должна явиться пособием для приобретения навыков в расчетах. Учитывая, что общеобразовательный уровень радиолюбителей значительно возрос, в книгу включен ряд задач повышенной трудности, а также рассмотрены некоторые методы расчетов, ранее мало освещенные в радиолюбительской литературе.

Так, например, в гл. 1 приводятся методы «наложения» и контурных токов при расчетах цепей, приводятся формулы для перехода от соединения «звезда» к эквивалентному «треугольнику» и обратно.

В гл. 2 рассматриваются расчеты цепей при воздействии на них несинусоидального напряжения, а гл. 3 предназначена для радиолюбителей-конструкторов, занимающихся проектированием различных электронных устройств для применения в народном хозяйстве. В этой главе приводятся задачи на разработку блок-схем различных радиоэлектронных устройств. Задачи на расчеты погрешностей измерений, вопросы измерения периодических несинусоидальных напряжений и обработки результатов измерений входят в гл. 4. Все задачи имеют ответы, а к задачам повышенной трудности даются указания или решения.

Малый объем не позволил охватить все разделы радиоэлектроники, а поэтому в книгу не включены задачи на расчет магнитных цепей, выпрямителей, усилителей и др., так как по этим вопросам имеется большое количество радиолюбительской литературы.

Все отзывы, пожелания и критические замечания, направленные по адресу Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия», редакция МРБ, будут восприняты автором с благодарностью.

С. Соколов

Глава первая

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Сопротивление металлического проводника вычисляют по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ ом}, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление, *ом · мм²/м*;
l — длина проводника, *м*;
S — площадь поперечного сечения проводника, *мм²*.

Сопротивление проводника при нагреве его до 200° С определяют по формуле

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)], \quad (2)$$

где R_1 — сопротивление проводника при начальной температуре, *ом*;
R_2 — сопротивление проводника при конечной температуре, *ом*;
t_1 — начальная температура, °С;
t_2 — конечная температура, °С;
α — температурный коэффициент сопротивления проводника, *1/град*.

Из формулы (2) следует

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{\alpha} \frac{R_2 - R_1}{R_1}. \quad (3)$$

Длину проводника, намотанного на круглую катушку (рис. 1, *а*), можно найти по формуле

$$l = \pi D_{ср} N, \quad (4)$$

где N — число витков;
$D_{ср}$ — средний диаметр витка, равный $D_{ср} = \frac{D_{вн} + D_н}{2}$.

При перемотке электромагнитов на заданное сопротивление обмотки диаметр провода ориентировочно можно определить по формуле

$$d \approx 1{,}41 \sqrt{\frac{\rho D_{ср} Q}{kR}}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление, *ом · мм²/м*;

k — коэффициент, учитывающий неплотность намотки провода; для эмалированных проводов диаметром до 0,3 *мм* $k = 1{,}15$, свыше 0,3 *мм* $k = 1{,}05$;
R — сопротивление обмотки, *ом*;
Q — площадь окна каркаса (*мм²*), равная $Q = h \frac{D_н - D_{вн}}{2}$.

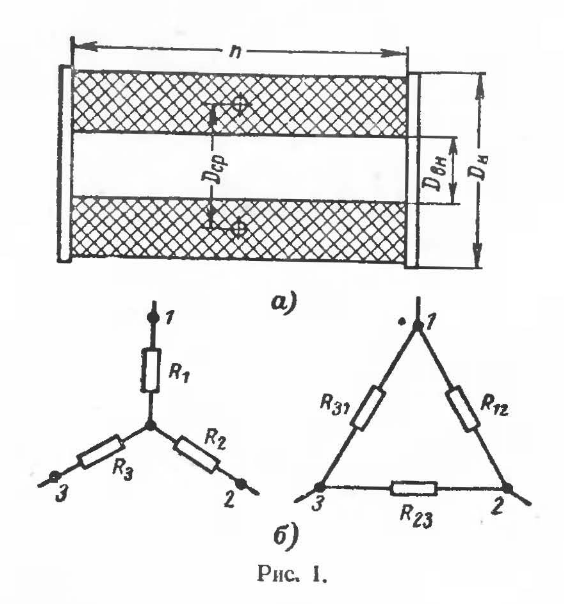


Рис. 1.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью

$$G = \frac{1}{R} \text{ сим}. \quad (6)$$

При последовательном соединении сопротивлений

$$R_{общ} = R_1 + R_2 + \dots + R_n; \quad (7)$$

если

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R,$$

то

$$R_{общ} = nR, \quad (8)$$

где n — количество одинаковых сопротивлений, соединенных последовательно.

При параллельном соединении сопротивлений

$$\frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_m}, \quad (9)$$

если $R_1 = R_2 = \dots = R_m = R$,

то

$$R_{общ} = \frac{R}{m}, \qquad (10)$$

$$G_{общ} = G_1 + G_2 + \dots + G_m, \qquad (11)$$

если $G_1 = G_2 = \dots = G_m = G$,

$$G_{общ} = mG. \qquad (12)$$

При параллельном соединении двух различных сопротивлений

$$R_{общ} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \qquad (13)$$

Соединение трех сопротивлений, показанное на рис. 1, *б*, называют «звезда» и «треугольник». При расчетах цепей бывает удобно преобразовать «треугольник» в эквивалентную «звезду» [1]. Такое преобразование производится по формулам

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \qquad (14)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \qquad (15)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \qquad (16)$$

Преобразование «звезды» в эквивалентный «треугольник» производится через проводимости по формулам

$$G_{12} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + G_3}; \qquad (17)$$

$$G_{23} = \frac{G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}; \qquad (18)$$

$$G_{31} = \frac{G_1 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}. \qquad (19)$$

Формулы (14)—(19) широко используются при расчетах трехфазных цепей переменного тока, однако применение этих формул иногда существенно упрощает расчет цепей постоянного тока (см. задачу 1-7).

Величина тока, протекающего через участок цепи, определяется законом Ома

$$I = \frac{U}{R}, \qquad (20)$$

U— напряжение на участке цепи, *в*;
R— сопротивление участка цепи, *ом*.

---

[1] Если какой-то участок или ветвь цепи заменить эквивалентом, то в остальных элементах цепи ток не изменится; говорят, что схема не «почувствует» замены.

Если в цепь включен источник э. д. с., имеющий внутреннее сопротивление, то величина тока определяется:

$$I = \frac{E}{R + r_0}, \qquad (21)$$

где E — э. д. с., *в*;
r_0— внутреннее сопротивление источника, *ом*;
R— сопротивление внешнего участка цепи, *ом*.

Из (20) следует, что напряжение на участке цепи, содержащей несколько последовательно включенных сопротивлений, равно сумме падений напряжений на каждом сопротивлении

$$U_{общ} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n. \qquad (22)$$

Тогда формулу (21) с учетом (22) можно преобразовать:

$$E = U + u_0 = IR + Ir_0, \qquad (23)$$

где U — падение напряжения на внешнем участке цепи, *ом*;
u_0— падение напряжения внутри источника э. д. с.

Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов, притекающих к узлу и направленных от этого узла, равна нулю:

$$\Sigma I = 0. \qquad (24)$$

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма всех э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжений на всех сопротивлениях этого контура:

$$\Sigma E = \Sigma U. \qquad (25)$$

В формуле (25) за положительные значения э. д. с. и падений напряжений принимаются те, которые совпадают с произвольно выбранным направлением обхода.

Токи, протекающие через параллельно соединенные сопротивления, обратно пропорциональны этим сопротивлениям

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}; \ \dots \ \frac{I_{m-1}}{I_m} = \frac{R_m}{R_{m-1}}. \qquad (26)$$

Несколько последовательно соединенных источников э. д. с. могут быть заменены одним, у которого э. д. с.

$$E_{общ} = E_1 + E_2 + \dots + E_n, \qquad (27)$$

а внутреннее сопротивление

$$r_{0\,общ} = r_{01} + r_{02} + \dots + r_{0\,n}. \qquad (28)$$

Работа электрического тока в единицу времени называется мощностью.

Мощность может быть подсчитана:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}, \text{ вт}. \qquad (29)$$

Коэффициент полезного действия может быть найден из отношения

$$\eta\% = \frac{P_п}{P} \cdot 100, \qquad (30)$$

где $P_п$ — полезная мощность, *вт*;
P — потребляемая мощность, *вт*;

При параллельном соединении конденсаторов их общая емкость равна:

$$C_{общ} = C_1 + C_2 + ... + C_m, \quad (31)$$

если

$$C_1 = C_2 = ... = C_m = C, \text{ то}$$

$$C_{общ} = mC, \quad (32)$$

где m — количество одинаковых конденсаторов, соединенных параллельно.

При последовательном соединении конденсаторов общую емкость можно вычислить по формуле

$$\frac{1}{C_{общ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}, \quad (33)$$

если $C_1 = C_2 = ... = C_n$, то

$$C_{общ} = \frac{C}{n}, \quad (34)$$

где n — количество одинаковых конденсаторов, соединенных последовательно.

При последовательном соединении двух конденсаторов общая емкость равна:

$$C_{общ} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (35)$$

Общее напряжение на конденсаторах, соединенных последовательно, равно:

$$U_{общ} = U_1 + U_2 + ... + U_n. \quad (36)$$

Напряжение на отдельных конденсаторах, соединенных последовательно, обратно пропорционально их емкости:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2}, \; \frac{U_3}{U_2} = \frac{C_2}{C_3}, \ldots, \frac{U_n}{U_{n-1}} = \frac{C_{n-1}}{C_n}. \quad (37)$$

При параллельном соединении конденсаторов напряжения на каждом из них равны между собой. **Постоянная времени цепи** характеризует время заряда и разряда накопителей энергии — конденсатора и катушки индуктивности, включенных в цепь. Если цепь составлена из сопротивления и емкости, то постоянная времени подсчитывается:

$$\tau = RC, \; сек, \quad (38)$$

где R — сопротивление цепи, *ом*;
C — емкость, *ф*.

При заряде конденсаторов через сопротивление напряжение на конденсаторе в любой момент времени можно определить по формуле

$$u_C = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \; в, \quad (39)$$

где t — время заряда конденсатора, *сек*;
$e = 2{,}72$ — основание натуральных логарифмов[1].

Ток заряда конденсатора в любой момент времени равен:

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \; а. \quad (40)$$

При последовательном соединении катушек индуктивности общая индуктивность

$$L_{общ} = L_1 + L_2 + ... + L_n. \quad (41)$$

При наличии магнитной связи между катушками, соединенными последовательно, общая индуктивность

$$L_{общ} = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad (42)$$

где $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ — взаимная индуктивность, *гн*;
k — коэффициент связи катушек, изменяющийся в пределах от 0 до 1.

Если магнитные потоки L_1 и L_2 совпадают, то берется $+2M$.

При параллельном соединении катушек индуктивности общую индуктивность определяют по формуле

$$\frac{1}{L_{общ}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_m}. \quad (43)$$

Для двух катушек индуктивности, соединенных параллельно,

$$L_{общ} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}. \quad (44)$$

При параллельном соединении катушек индуктивности и наличии связи между ними общая индуктивность

$$L_{общ} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}. \quad (45)$$

Если магнитные потоки L_1 и L_2 совпадают, то берется $-2M$.

Постоянная времени цепи, состоящей из последовательно включенных сопротивления и индуктивности, определяется как

$$\tau = \frac{L}{R}, \; сек, \quad (46)$$

где L — индуктивность, *гн*;
R — сопротивление, *ом*.

Величина тока в любой момент времени в цепи с индуктивностью определяется по формуле

$$i = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (47)$$

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Ограничимся рассмотрением основных методов расчета электрических цепей, наиболее приемлемых в радиолюбительской практике.

Расчет неразветвленной электрической цепи производится по закону Ома.

---

[1] Таблица значений e^{-x} приводится в приложении.

Расчет разветвленной электрической цепи с одним источником э. д. с. может быть сведен к расчету по закону Ома и первому закону Кирхгофа путем последовательного преобразования цепи в неразветвленную по формулам последовательного и параллельного соединения сопротивлений, а также путем преобразования «звезды» в эквивалентный «треугольник» или наоборот.

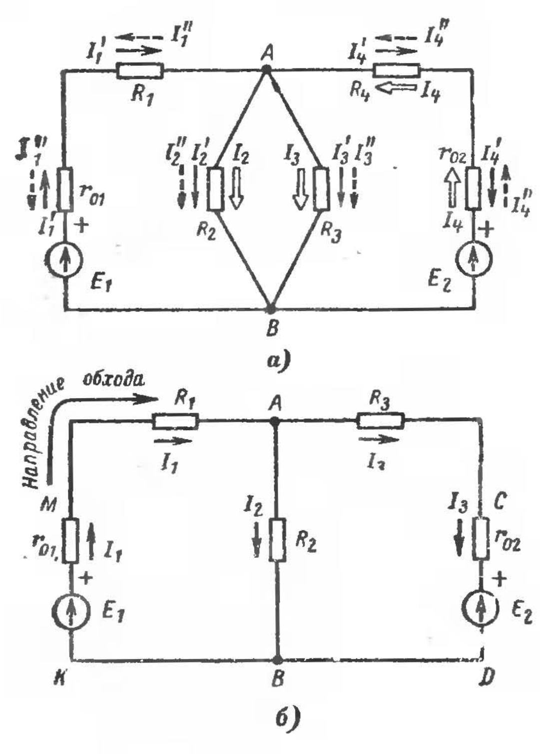


Рис. 2.

Эти методы хорошо известны радиолюбителям и особых пояснений не требуют.

Метод «наложения» применяется при расчете линейных разветвленных электрических цепей, содержащих несколько источников э. д. с., обычно не более двух-трех, так как при большем числе источников э. д. с. расчеты получаются громоздкими.

Рассмотрим применение этого метода на конкретном примере.

В электрической цепи (рис. 2, *а*) $E_1=3$ *в*; $r_{01}=0{,}5$ *ом*; $E_2=6$ *в*; $r_{02}=1$ *ом*; $R_1=1$ *ом*; $R_2=R_3=6$ *ом*; $R_4=2$ *ом*. Рассчитать цепь.

Мысленно исключим из цепи источник E_2 (замкнем его накоротко), но при этом оставим в схеме его внутреннее сопротивление r_{02} и рассчитаем частичные токи в цепи, создаваемые источником E_1. Частичные токи от источника E_1 обозначены на схеме сплошными стрелками. По формулам для последовательного и параллельного соединения сопротивлений найдем общее сопротивление цепи R' для источника E_1

$$R'=r_{01}+R_1+\frac{\frac{R_2}{2}(R_4+r_{02})}{\frac{R_2}{2}+R_4+r_{02}}=0{,}5+1+\frac{3(2+1)}{3+2+1}=3\ ом;$$

по закону Ома

$$I_1'=\frac{E_1}{R'}=\frac{3}{3}=1\ a.$$

Так как эквивалентное сопротивление параллельных ветвей R_2 и R_3 равно 3 *ом* и равно $R_4+r_{02}=3$ *ом*, то $I_4'=I_2'+I_3'=\frac{I_1'}{2}=$ $=\frac{1}{2}=0{,}5\ a$, а $I_2'=I_3'=0{,}25\ a$.

Таким образом, мы нашли все частичные токи, протекающие от E_1. Теперь мысленно исключим источник E_1, оставив в схеме r_{01}, и аналогично рассчитаем частичные токи от источника E_2, обозначив их на схеме пунктирными стрелками.

В результате расчета получим:

$$R''=4\ ом,\quad I_1''=1\ a,\quad I_2''=I_3''=0{,}25\ a,\quad I_4''=1{,}5\ a.$$

Для расчета токов, протекающих в цепи при включении обоих источников э. д. с. E_1 и E_2, можно произвести сложение первых и вторых частичных токов, учитывая их направления. Результирующие токи будем обозначать двойными стрелками.

Токи I_2' и I_2'' направлены в одну сторону:

$$I_2=I_2'+I_2''=0{,}25+0{,}25=0{,}5\ a,\ \text{аналогично}$$

$$I_3=I_3'+I_3''=0{,}25+0{,}25=0{,}5\ a.$$

Токи I_4' и I_4'' направлены в разные стороны, при этом $|I_4''|>|I_4'|$; $I_4=I_4''-I_4'=1{,}5-0{,}5=1\ a$ и направлен в сторону тока I_4''.

Так как $|I_1'|=|I_1''|$, но направлены в разные стороны, $I_1=0$.

Подсчет мощностей, рассеиваемых на отдельных сопротивлениях, производится по значениям результирующих токов, так как сумма частичных мощностей, рассчитанных от частичных токов, не равна мощности от суммарного тока. В этом нетрудно убедиться, подсчитав, например мощность, рассеиваемую на сопротивлении R_2. Действительно, $I_2^2R_2=0{,}25\cdot 6=1{,}5$ *вт*, но не $(I_2')^2R_2+(I_2'')^2R_2=0{,}0625\cdot 6+$ $+0{,}0625=0{,}75$ *вт*.

Это объясняется тем, что мощность, рассеиваемая на сопротивлении, пропорциональна квадрату тока. Таким образом,

$$P=I^2R=(I'+I'')^2R=[(I')^2+2I'I''+(I'')^2]R.$$

Если же определять мощность по частичным токам, то

$$P = [(I')^2 + (I'')^2] R.$$

Очевидно, что выражения в квадратных скобках не равны между собой, так как квадрат суммы двух чисел не равен сумме квадратов этих чисел.

Если электрическая цепь содержит три источника э. д. с., то вначале рассчитываются частичные токи от E_1, а E_2 и E_3 исключаются, затем от E_2, а E_1 и E_3 исключаются и, наконец, от E_3, исключая E_1 и E_2; при этом внутренние сопротивления источников из схемы не исключаются.

Таким образом, число суммируемых частичных токов всегда равно числу источников э. д. с.

Кажущаяся на первый взгляд некоторая громоздкость метода «наложения» окупается простотой и наглядностью расчетов.

Метод контурных токов основывается на первом и втором законах Кирхгофа и используется при расчетах электрических цепей с несколькими источниками э. д. с. Этот метод более подробно освещен в радиолюбительской литературе, а поэтому ограничимся лишь некоторыми замечаниями. Пусть требуется рассчитать электрическую цепь (рис. 2, *б*). Прежде чем составить уравнения для расчета цепи, необходимо:

а) произвольно выбрать направления токов в ветвях и обозначить их на схеме;

б) определить число независимых контуров в схеме и произвольно выбрать направление их обхода (независимыми контурами называются контуры, отличающиеся друг от друга хотя бы одной ветвью). Для схемы, изображенной на рис. 2, *б*, имеем два независимых контура *МАВК* и *МАСДВК* (но могут быть выбраны и иные контуры, например, *МАВК* и *АСДВ* или *МАСДВК* и *АСДВ*);

в) определить число узлов в схеме, в нашем примере два узла *А* и *В*;

г) составить уравнения по первому и второму законам Кирхгофа и решить полученную систему уравнений.

Число уравнений по первому закону Кирхгофа на единицу меньше числа узлов, а по второму закону равно числу независимых контуров.

Для схемы рис. 2, *б* получим:

$$\left.\begin{aligned} &I_1 = I_2 + I_3; \\ &E_1 = I_1 r_{01} + I_1 R_1 + I_2 R_2; \\ &E_1 - E_2 = I_1 r_{01} + I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_3 r_{02}. \end{aligned}\right\}$$

Расчет нелинейных электрических цепей значительно сложнее, однако в радиолюбительской практике с достаточной точностью такой расчет может быть произведен графическим методом с помощью вольт-амперных характеристик.

Пусть требуется рассчитать цепь (рис. 3, *а*), состоящую из нелинейного сопротивления R_u и линейных сопротивлений R_1 и R_2, вольт-амперные характеристики которых приведены на рис. 3, *б*.

Исходя из того, что для двух параллельных сопротивлений

$$i = i_1 + i_u;$$

$$u_1 = u_u,$$

построим результирующую вольт-амперную характеристику для параллельно соединенных R_u и R_1.

При последовательном соединении сопротивлений в цепи протекает один и тот же ток, а общее падение напряжения равно сумме падений напряжений на каждом сопротивлении

$$u = u_1 + u_2,$$

что и определяет построение вольт-амперной характеристики при последовательном соединении (рис. 3, *б*).

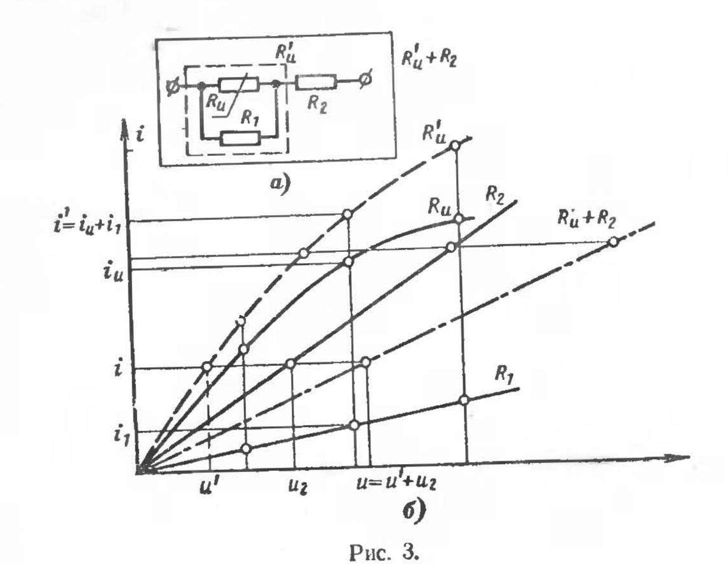


Рис. 3.

Как видно из рис. 3, *б*, результирующая характеристика цепи получилась близкой к линейной. Спрямление нелинейной вольт-амперной характеристики путем последовательного и параллельного включения линейных сопротивлений широко применяется на практике, например для получения равномерной шкалы электронных термометров с терморезисторами.

Задачи

1-1. Определить материал провода, если сопротивление двух метров равно 28 *ом*, а его диаметр 0,3 *мм*.

1-2. Определить длину кабеля, намотанного на барабан, если диаметр медной жилы 0,5 *мм*, а ее сопротивление постоянному току 3 *ом*.

1-3. Первичная обмотка силового трансформатора при температуре 20° С имеет сопротивление 6 *ом*. Определить температуру на-

грева трансформатора, если через 2 *ч* работы сопротивление обмотки увеличилось на 1 *ом*. Провод обмотки медный.

1-4. Допустим ли нагрев обмоток трансформатора из провода ПЭВ-2, если сопротивление первичной обмотки увеличилось с 9 до 12 *ом*, а температура окружающей среды 25° С.

1-5. Преобразовать «звезду» в эквивалентный «треугольник», если $R_1=50$ *ом*, $R_2=40$ *ом*, $R_3=20$ *ом*.

1-6. Преобразовать «треугольник» в эквивалентную «звезду», если $R_{12}=80$ *ом*, $R_{23}=40$ *ом*, $R_{31}=20$ *ом*.

1-7. Найти общее сопротивление цепи (рис. 4), если $R_1=1{,}5$ *ком*, $R_2=200$ *ом*, $R_3=150$ *ом*, $R_4=800$ *ом*, $R_5=0{,}4$ *ком*, $R_6=1{,}2$ *ком*, $R_7=450$ *ом*.

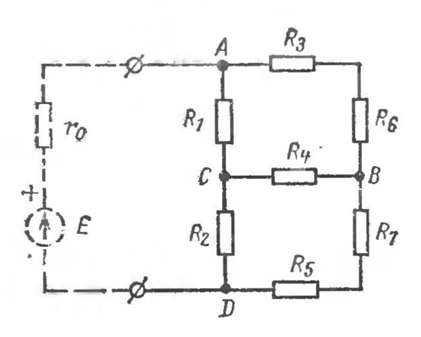


Рис. 4.

1-8. Необходимо перемотать катушку электромагнита (рис. 1, *а*) так, чтобы при полном заполнении каркаса ($D_{вн}=10$ *мм*, $D_н=16$ *мм*, $h=56$ *мм*) сопротивление катушки постоянному току было равно 10 *ом*. Определить диаметр медной проволоки и число витков.

1-9. Рассчитать цепь (рис. 4), если к ее зажимам подключен источник $E=30$ *в*, $r_0=10$ *ом*. Величины сопротивлений принять по условию задачи 1-7.

1-10. Определить сопротивление резистора автоматического смещения $R_к$ и мощность, рассеиваемую на нем (рис. 5), если $I_к=6$ *ма*, а $U_к$ должно быть 3 *в*.

1-11. Рассчитать делитель напряжения (рис. 5), если $I_{э1}=2$ *ма*, $U_э=60$ *в*, $E=240$ *в* (принять $I_{дел}=4\,I_{э1}$).

1-12. Определить сопротивление резистора фильтра $R_ф$ и мощность, рассеиваемую на нем (рис. 5), если $I_а=4$ *ма*, $R_а=20\,000$ *ом*, $E=240$ *в*, а $U_а$ должно быть 150 *в*.

1-13. Рассчитать шунт к микроамперметру ($i_0=100$ *мка*, $r_0=300$ *ом*) для измерения прибором тока до 100 *ма*.

1-14. В трехпредельном вольтметре (рис. 6, *а*) сгорело добавочное сопротивление R_2. Определить R_2, i_0, r_0, если $R_1=9\,650$ *ом*, $R_3=299{,}65$ *ком*, $U_1=10$ *в*, $U_2=50$ *в*, $U_3=300$ *в*.

1-15. Рассчитать добавочные сопротивления R_1, R_2 и R_3 (рис. 6, *а*) для пределов 0—10 *в*, 0—50 *в*, 0—300 *в*, если $i_0=100$ *мка*, $r_0=300$ *ом*.

1-16. Рассчитать универсальный шунт к миллиамперметру ($i_0=1$ *ма*, $r_0=100$ *ом*) (рис. 6, *б*) для пределов 0—10 *ма*, 0—100 *ма*, 0—1 000 *ма*.

1-17. Рассчитать ступенчатый делитель напряжения с постоянным выходным сопротивлением (аттенюатор) $R_{вых}=100$ *ом* и $K_{дел}=10$ (рис. 7).

1-18. Согласовать делитель, рассчитанный в задаче 1-17, с генератором, если внутреннее сопротивление генератора $r_0=300$ *ом*.

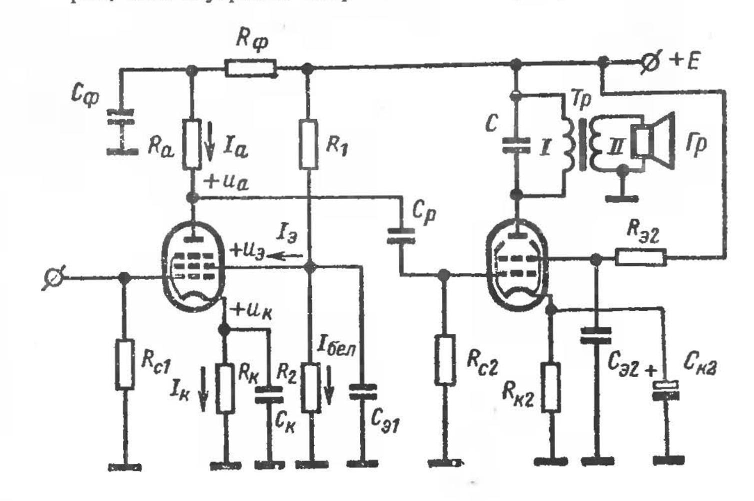


Рис. 5.

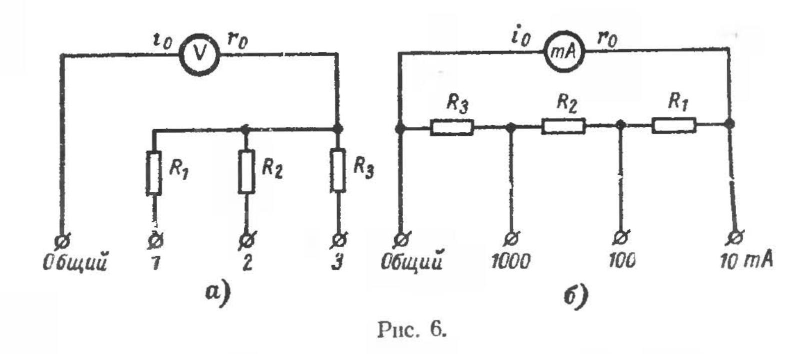
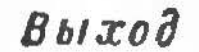


Рис. 6.

Указание: источник тока и нагрузка называются согласованными, если внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению нагрузки, при этом в нагрузку отдается максимальная мощность.

1-19. Рассчитать цепь (рис. 8, *а*) методом наложения, если $E_1=3$ *в*, $r_{01}=1{,}5$ *ом*, $E_2=6$ *в*, $r_{02}=0{,}5$ *ом*, $R_1=1{,}5$ *ом*, $R_2=2$ *ом*, $R_3=6$ *ом*, $R_4=2{,}5$ *ом*.

1-20. Рассчитать цепь (рис. 8, *б*) методом контурных токов, если $E_1=9$ *в*, $r_{01}=1{,}5$ *ом*, $E_2=27$ *в*, $r_{02}=3$ *ом*, $E_3=22$ *в*, $r_{03}=1$ *ом*, $R_1=0{,}5$ *ом*, $R_2=2$ *ом*, $R_3=3$ *ом*, $R_4=2$ *ом*.



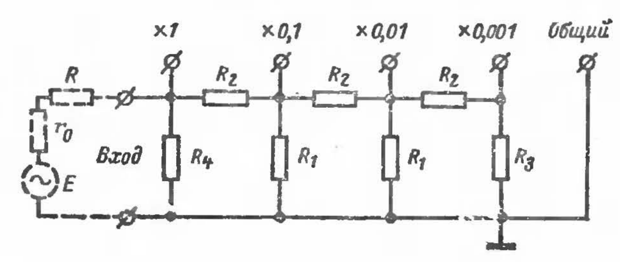


Рис. 7.

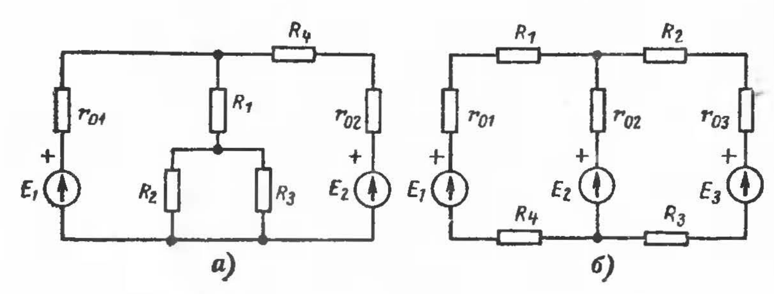


Рис. 8.

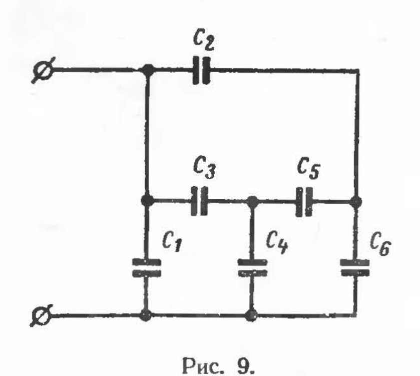


Рис. 9.

1-21. Определить общую емкость батареи конденсаторов (рис. 9) и напряжение на каждом конденсаторе, если $U=50$ *в*, а $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=1$ *мкф*.

1-22. Конденсатор емкостью 0,1 *мкф* заряжается через резистор сопротивлением 50 *ком*. Через какое время напряжение на конденсаторе будет равно половине напряжения источника E?

1-23. Определить емкость разделительного конденсатора (рис. 5) $C_р$, если сопротивление утечки сетки $R_{c2}=1{,}0$ *Мом*, а постоянная времени переходной цепи для хорошего прохождения низких частот должна быть не менее 14 *мсек*.

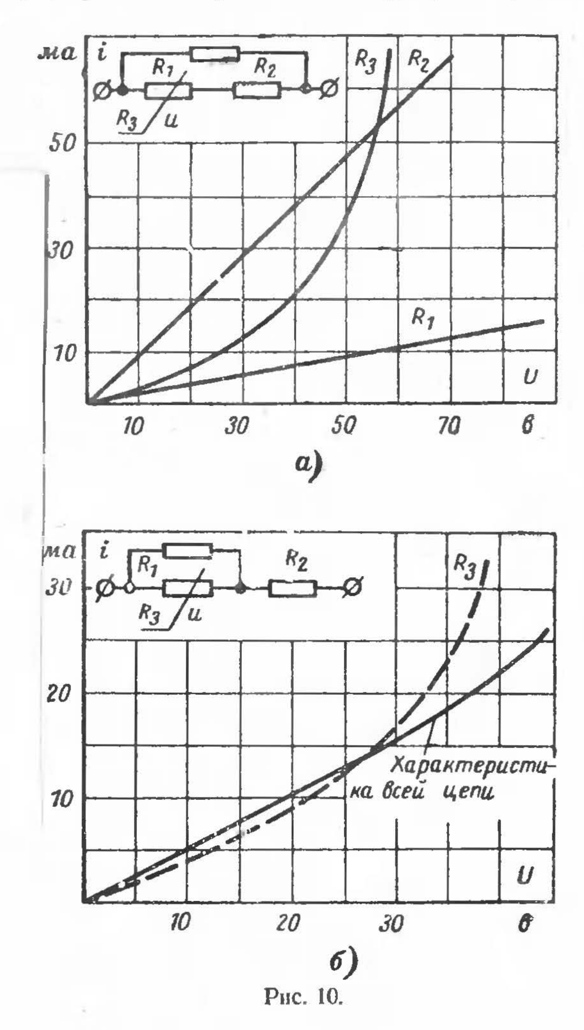


Рис. 10.

1-24. Построить результирующую вольт-амперную характеристику цепи (рис. 10, *а*) и определить ток, если $U=35$ *в*.

1-25. Определить сопротивление резисторов R_1 и R_2, если известна вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления и требуемая вольт-амперная характеристика всей цепи (рис. 10, *б*).

1-26. Два дросселя индуктивностью 4 и 6 *гн* включены параллельно. Чему равна общая индуктивность?

1-27. Обмотка реле имеет индуктивность 1,2 *гн* и активное сопротивление 1 200 *ом*. Какой ток будет протекать через обмотку через 0,002 *сек*, если напряжение батареи 24 *в*?

1-28. Обмотка реле имеет индуктивность 1,0 *гн* и активное сопротивление 800 *ом*. Ток срабатывания реле 20 *ма*. Через какое время ток в обмотке будет равен току срабатывания, если напряжение батареи 20 *в*?

Указание: При решении задач 1-22, 1-27, 1-28 использовать таблицу значений показательной функции e^{-x} (приложение 2).

Глава вторая

ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Синусоидальным переменным током (рис. 11, *а*) называется ток, который изменяется по закону синуса

$$i = I_m \sin \omega t, \tag{48}$$

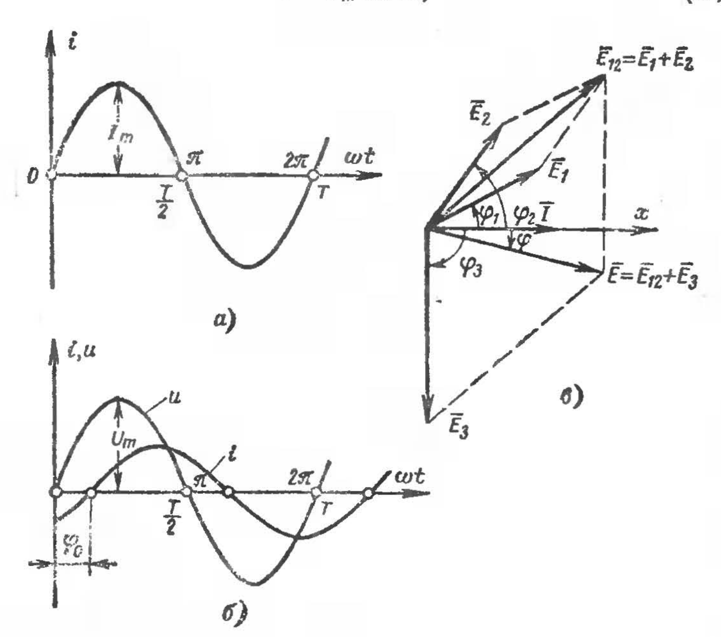


Рис. 11.

где i — мгновенное значение переменного тока;
I_m — амплитуда (максимальное значение) тока;
ω — круговая или угловая частота $сек^{-1}$;
t — время, *сек*.

Аналогично для напряжения можно записать

$$u = U_m \sin \omega t. \tag{49}$$

Частота переменного тока

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}, \ гц, \tag{50}$$

где T — период, *сек*.

Фаза характеризует состояние колебания в данный момент времени и равна

$$\varphi = \omega t + \varphi_0, \tag{51}$$

где φ_0 — начальная фаза колебаний при $t=0$.

Если одно колебание проходит через свои нулевые (или максимальные) значения раньше другого, то говорят, что первое колебание опережает второе по фазе на угол

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Для случая, изображенного на рис. 11, *б*,

$$u = U_m \sin \omega t, \ i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

ток отстает от напряжения на угол φ_0.

Действующее (эффективное) значение синусоидального переменного тока определяется по формуле

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_m. \tag{52}$$

Соответственно

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 U_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 E_m.$$

Среднее значение синусоидального переменного тока за половину периода

$$I_{ср} = \frac{2I_m}{\pi} = 0{,}637 I_m. \tag{53}$$

Соответственно

$$U_{ср} = \frac{2U_m}{\pi} = 0{,}637 U_m;$$

$$E_{ср} = \frac{2E_m}{\pi} = 0{,}637 E_m.$$

Среднее значение синусоидального переменного тока за период равно нулю. Отношение действующего значения тока к среднему

значению тока называется **коэффициентом формы кривой**. Для синусоидального тока или напряжения

$$K_ф = \frac{I}{I_{ср}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11. \quad (54)$$

Соответственно

$$K_ф = \frac{U}{U_{ср}} = \frac{E}{E_{ср}}. \quad (55)$$

Синусоидальные величины удобно представлять и складывать с помощью векторных диаграмм.

Векторной дигра*ммой называется совокупность нескольких векторов, расположенных на плоскости или в пространстве, изображающих синусоидально изменяющиеся величины одной и той же частоты. На практике векторные диаграммы используются главным образом для определения амплитудных или действующих значений синусоидальных величин и сдвигов фаз между ними.

При построении векторной диаграммы длины векторов изображаются в выбранном масштабе. Один из векторов располагается произвольно обычно вдоль горизонтальной или вертикальной оси, а все остальные векторы по отношению к нему под углами, равными соответствующим сдвигам фаз. Пример определения суммарного тока и суммарной э. д. с. с помощью векторной диаграммы показан на рис. 11, *в*[1].

В цепях переменного тока различают активное, индуктивное и емкостное сопротивления, величины которых зависят от частоты.

Активное сопротивление возрастает с увеличением частоты вследствие поверхностного эффекта. Для круглых медных проводников величина сопротивления в зависимости от частоты определяется по формуле

$$R_f \approx 0,093 \frac{l\sqrt{f}}{d}, \text{ ом}, \quad (56)$$

где l — длина проводника, *м*;
f — частота тока, *Мгц*;
d — диаметр проводника, *мм*.

Индуктивное сопротивление возрастает с увеличением частоты и равно:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \text{ ом}, \quad (57)$$

где f — частота, *гц*;
L — индуктивность, *гн*.

Ток в цепи с индуктивностью отстает от напряжения на 90°.

Емкостное сопротивление уменьшается с увеличением частоты и равно:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ ом}, \quad (58)$$

где f — частота, *гц*;
C — емкость, *ф*.

Ток в цепи с емкостью опережает напряжение на 90°.

[1] Более подробно о векторных диаграммах см. в книге Н. М. Изюмова и Д. П. Линде «Основы радиотехники», изд. 2-е, МРБ, вып. 578, стр. 27—36.

Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 12, *а*), определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \text{ ом}. \quad (59)$$

Индуктивное сопротивление (X_L) и емкостное сопротивление (X_C) называют реактивными сопротивлениями. Реактивные элементы L и C могут запасать электрическую энергию в магнитном и электрическом полях, обмениваться энергией между собой и отдавать энергию источнику. Однако индуктивное и емкостное сопротивления по отношению к источнику компенсируют друг друга, а поэтому в (59) общее реактивное сопротивление равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений $X = X_L - X_C$, если $X_L > X_C$, то цепь носит индуктивный характер, а если $X_C > X_L$, то емкостный. При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений цепь ведет себя как чисто активное сопротивление.

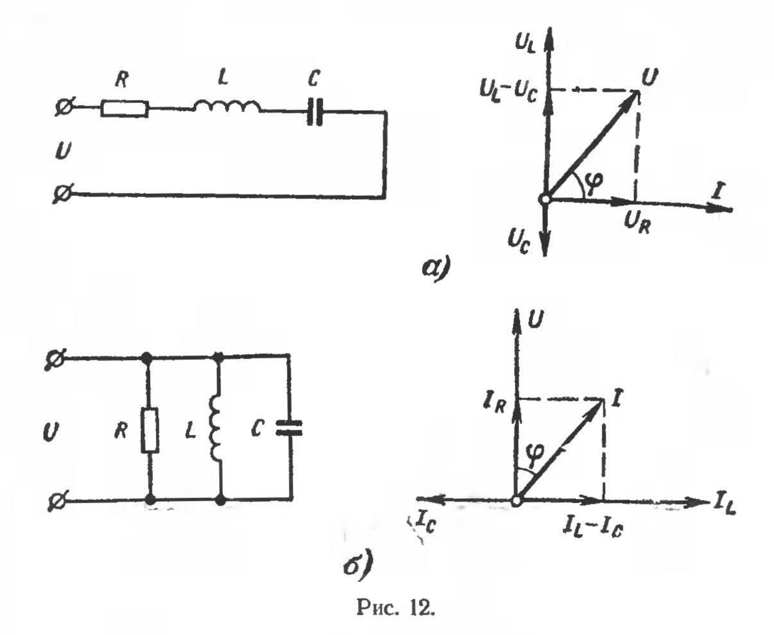


Рис. 12.

Из (59) можно получить выражения для полного сопротивления цепи, состоящей из активного и одного или двух любых реактивных сопротивлений. Так, например, если цепь состоит только из последовательно включенных активного сопротивления и индуктивности, то, полагая в (59) $X_C = 0$, получим:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Ток, протекающий в последовательной цепи при включении переменного напряжения, определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \qquad (60)$$

Падения напряжения на активном, емкостном и индуктивном сопротивлениях определяются по формулам:

$$U_а = IR; \qquad (61)$$

$$U_C = IX_C; \qquad (62)$$

$$U_L = IX_L, \qquad (63)$$

а общее напряжение, приложенное к зажимам цепи, равно:

$$U = \sqrt{U_а^2 + (U_L - U_C)^2} = IZ. \qquad (64)$$

Если последовательная цепь переменного тока имеет емкостный характер ($X_C > X_L$), то ток опережает напряжение, а если индуктивный ($X_L > X_C$), то ток отстает от напряжения на угол φ, который можно определить из следующих формул:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_а}{U}; \qquad (65)$$

$$\sin\varphi = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{X}{Z}. \qquad (66)$$

Мощность, выделяемая на активном сопротивлении,

$$P_а = I^2 R = UI\cos\varphi,\ вт, \qquad (67)$$

где cos φ — коэффициент использования мощности.

Мощность, характеризуемая запасенной энергией за период колебаний в реактивных элементах, называется реактивной

$$Q = Q_L - Q_C = I^2 X_L - I^2 X_C = UI\sin\varphi,\ вар. \qquad (68)$$

Реактивная мощность Q количественно характеризует интенсивность обмена энергией между источником и реактивными элементами цепи.

Реактивную мощность индуктивного характера Q_L считают положительной, а емкостного характера Q_C — отрицательной. Полная мощность определяется по формуле

$$S = \sqrt{P_а^2 + Q^2} = UI, \qquad (69)$$

где S — полная мощность, *ва*.

Векторную диаграмму для последовательной цепи (рис. 12, *а*) начинают с построения вектора общего тока I.

При параллельном соединении (рис. 12, *б*) активного сопротивления, индуктивности и емкости к каждой ветви приложено полное напряжение источника.

Токи в ветвях равны:

$$I_а = \frac{U}{R}; \qquad (70)$$

$$I_L = \frac{U}{X_L}; \qquad (71)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C}. \qquad (72)$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{I_а^2 + (I_L - I_C)^2}. \qquad (73)$$

Векторную диаграмму для параллельной цепи начинают с построения вектора напряжения источника U (рис. 12, *б*).

Как и при последовательном соединении, разветвленная цепь может иметь емкостный характер ($I_C > I_L$) или индуктивный ($I_L > I_C$). Угол сдвига по фазе между общим током и напряжением определяется по формуле

$$\varphi = \arccos\frac{I_а}{I}. \qquad (74)$$

Активная, реактивная и полная мощность для рассматриваемой параллельной цепи (рис. 12, *б*) определяются по формулам

$$P_а = UI\cos\varphi,\ вт; \qquad (75)$$

$$Q = UI\sin\varphi,\ вар; \qquad (76)$$

$$S = UI = \sqrt{P_а^2 + Q^2},\ ва. \qquad (77)$$

Несколько сложнее аналитический расчет разветвленной цепи, ветви которой содержат последовательно соединенные активные и реактивные элементы.

Рассмотрим расчет такой цепи на конкретном примере. К электрической цепи (рис. 13, *а*) приложено напряжение $U = 60$ *в*, $R_1 = 8$ *ом*, $X_L = 6$ *ом*, $R_2 = 3$ *ом*, $X_C = 4$ *ом*. Требуется определить токи в каждой ветви, общий ток и активные и реактивные мощности.

Согласно (59), (60), (65)—(69) для первой ветви имеем:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\ ом;$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{60}{10} = 6а;$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{8}{10} = 0{,}8;$$

$$\sin\varphi_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1} = \frac{6}{10} = 0{,}6;$$

$$P_{а1} = UI_1\cos\varphi_1 = 60\cdot 6\cdot 0{,}8 = 288\ вт;$$

$$Q_1 = UI_1\sin\varphi_1 = 60\cdot 6\cdot 0{,}6 = 216\ вар;$$

$$S_1 = UI_1 = 60\cdot 6 = 360\ ва.$$

Аналогично для второй ветви

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\ ом;$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{60}{5} = 12\ а;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{3}{5} = 0,6;$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{X_C}{Z_2} = \frac{4}{5} = 0,8;$$

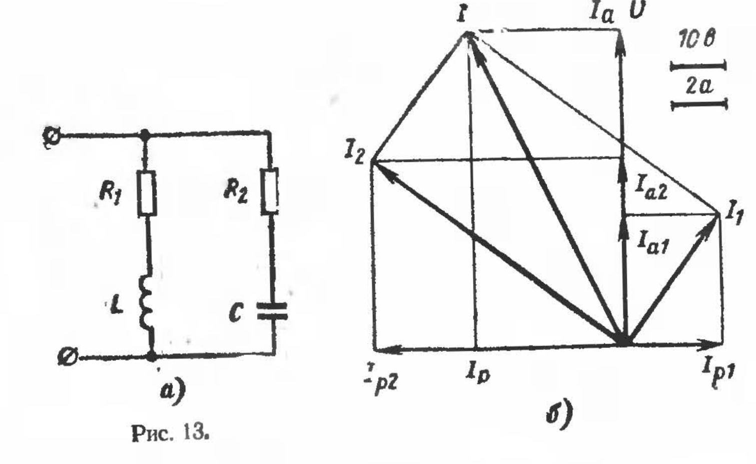


Рис. 13.

$$P_{a2} = UI_2\cos\varphi_2 = 60 \cdot 12 \cdot 0,6 = 432\ вт;$$

$$Q_2 = UI_2\sin\varphi_2 = 60 \cdot 12 \cdot 0,8 = 576\ вар;$$

$$S_2 = UI_2 = 60 \cdot 12 = 720\ ва.$$

Общий ток до разветвления

$$I \neq I_1 + I_2,$$

так как I_1 и I_2 содержат активные и реактивные составляющие.

Для того чтобы определить общий ток, необходимо вначале определить активные и реактивные составляющие токов каждой ветви.

Из (65), (66) с учетом (61)—(64) следует:

$$I_{a1} = I_1\cos\varphi_1 = 6 \cdot 0,8 = 4,8\ а;$$

$$I_{p1} = I_1\sin\varphi_1 = 6 \cdot 0,6 = 3,6\ а;$$

$$I_{a2} = I_2\cos\varphi_2 = 12 \cdot 0,6 = 7,2\ а;$$

$$I_{p2} = I_2\sin\varphi_2 = 12 \cdot 0,8 = 9,6\ а.$$

Тогда для неразветвленной части цепи

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 4,8 + 7,2 = 12\ а;$$

$$I_p = I_{p2} - I_{p1} = 9,6 - 3,6 = 6\ а;$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{12^2 + 6^2} = 13,4\ а;$$

$$\cos\varphi = \frac{I_a}{I} = \frac{12}{13,4} = 0,895;$$

$$\sin\varphi = \frac{I_p}{I} = \frac{6}{13,4} = 0,45;$$

$$P_a = UI\cos\varphi = 60 \cdot 13,4 \cdot 0,895 = 720\ вт;$$

$$Q = UI\sin\varphi = 60 \cdot 13,4 \cdot 0,45 = 360\ вар;$$

$$S = UI = 60 \cdot 13,4 = 804\ ва.$$

Нетрудно убедиться, что

$$P_a = P_{a1} + P_{a2} = 288 + 432 = 720\ вт;$$

$$Q = Q_2 - Q_1 = 576 - 216 = 360\ вар,$$

$$но\ S \neq S_1 + S_2.$$

Векторная диаграмма рассчитанной цепи приведена на рис. 13, *б*.

Задачи

2-1. Определить период, круговую частоту и амплитудное значение напряжения, если $U=220$ *в*, $f=50$ *гц*.

2-2. Синусоидальный ток изменяется по закону $i=0,3\sin 900\,t$. Определить амплитудное и действующее значение тока, частоту и период колебаний.

2-3. Определить частоту, если известен период колебаний переменного тока $T_1=10$ *мксек*; $T_2=540$ *мсек*; $T_3=0,01$ *сек*.

2-4. Определить действующие и средние значения переменного тока и напряжения, если $I_m=0,18$ *а*; $U=36$ *в*.

2-5. Определить амплитудное и среднее значение тока и напряжения, если $I=0,08$ *а*; $U=3$ *в*.

2-6. Определить сопротивление медного проводника $d=0,8$ *мм* и $l=10$ *м* на частоте $f=10^6$ *гц*.

2-7. Во сколько раз сопротивление медного проводника $d=0,9$ *мм* и $l=5$ *м* на частоте $f=0,5$ *Мгц* больше, чем его сопротивление постоянному току?

2-8. Определить индуктивное сопротивление катушки $L=0,3$ *гн* на частотах 50, 100, 150 и 200 *гц* и построить график зависимости X_L от частоты.

2-9. Определить емкостное сопротивление конденсатора $C=0,5$ *мкф* на частотах 50, 100, 150 и 200 *гц* и построить график зависимости X_C от частоты.

2-10. Катушка $L=20$ *мгн* имеет активное сопротивление $R=4$ *ом*. Определить полное сопротивление катушки на частотах $f_1=500$ *гц* и $f_2=5\,000$ *гц*.

2-11. Активное сопротивление $R=100$ *ом* соединено последовательно с конденсатором $C=0{,}01$ *мкф*. Определить полное сопротивление на частоте $f=300$ *гц*.

2-12. Катушка $L=12$ *мгн* и $R=3$ *ом* соединена последовательно с конденсатором $C=0{,}033$ *мкф*. Определить полное сопротивление на частоте $f=30$ *кгц*.

2-13. Рассчитать последовательную цепь переменного тока с частотой $f=400$ *гц*, если $R=120$ *ом*, $L=0{,}5$ *гн*, $C=0{,}2$ *мкф*. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. $U=60$ *в*.

2-14. Рассчитать параллельную цепь переменного тока частотой $f=1\,000$ *гц*, содержащую две ветви, если первая ветвь содержит активное сопротивление $R=300$ *ом*, а вторая емкость $C=0{,}1$ *мкф*. К зажимам цепи приложено напряжение $U=36$ *в*. Построить векторную диаграмму.

2-15. Рассчитать параллельную цепь переменного тока частотой $f=420$ *гц*, если первая ветвь содержит активное сопротивление $R=200$ *ом*, вторая ветвь катушку индуктивности $L=50$ *мгн* с активным сопротивлением $R_L=15$ *ом* и третья ветвь емкостью $C=0{,}5$ *мкф*. Построить векторную диаграмму $U=100$ *в*.

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ

Периодические несинусоидальные токи и напряжения описываются кривыми, показанными на рис. 14, 15, а также кривыми более сложной формы.

Как известно, периодические несинусоидальные токи и напряжения могут быть представлены в виде постоянной составляющей тока или напряжения и бесконечной суммы гармонических (синусоидальных и косинусоидальных) составляющих с разными амплитудами, частотами и фазами (колебание представляется рядом Фурье), например:

$$a(t) = A_0 + A'_{1m}\sin\omega t + A''_{1m}\cos\omega t + A'_{2m}\sin 2\omega t + A''_{2m}\cos 2\omega t + \cdots + A'_{km}\sin k\omega t + A''_{km}\cos k\omega t, \quad (78)$$

где A_0 — постоянная составляющая;

A'_{1m} — амплитуда синусоидальной составляющей первой гармоники;

A''_{1m} — амплитуда косинусоидальной составляющей первой гармоники;

A'_{2m} — амплитуда синусоидальной составляющей второй гармоники и т. д.

Совокупность гармонических составляющих кратных частот, образующих периодический синусоидальный ток (напряжение), называется **спектром**. Ширина спектра и его состав зависят от периода и формы колебания.

Ряд Фурье может быть записан в другой форме:

$$a(t) = A_0 + A_{1m}\sin(\omega t + \varphi_1) + A_{2m}\sin(2\omega t + \varphi_2) + A_{3m}\sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + A_{km}\sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (79)$$

где $A_{km} = \sqrt{(A'_{km})^2 + (A''_{km})^2}$ — амплитуда k-й гармоники ряда;

$\varphi_k = \operatorname{arctg}\dfrac{A''_{km}}{A'_{km}}$ — начальная фаза k-й гармоники ряда.

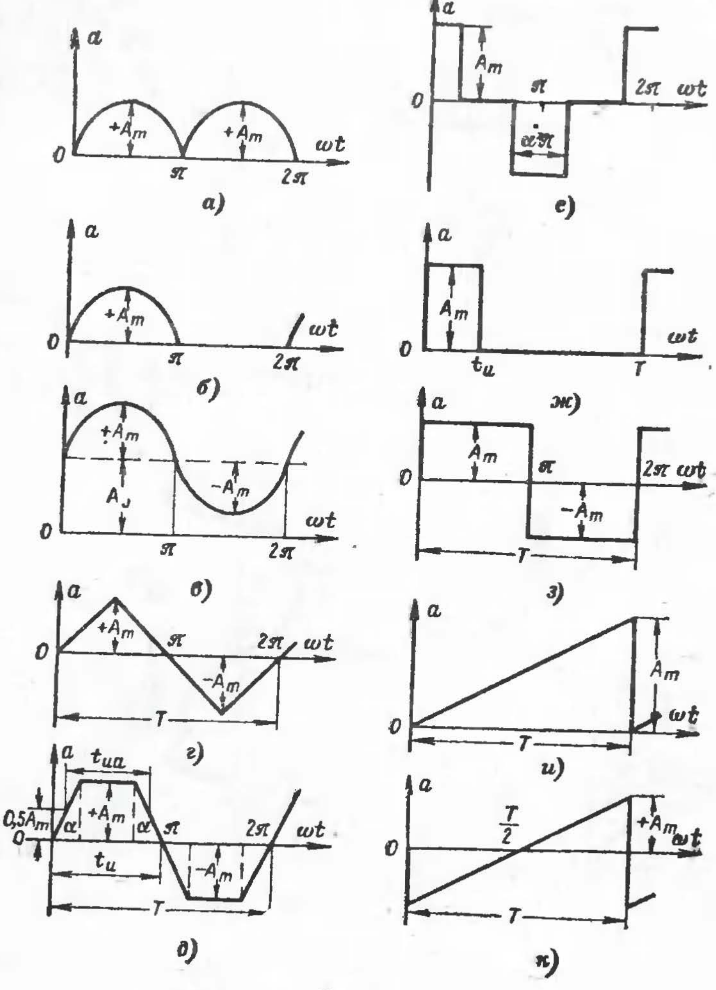
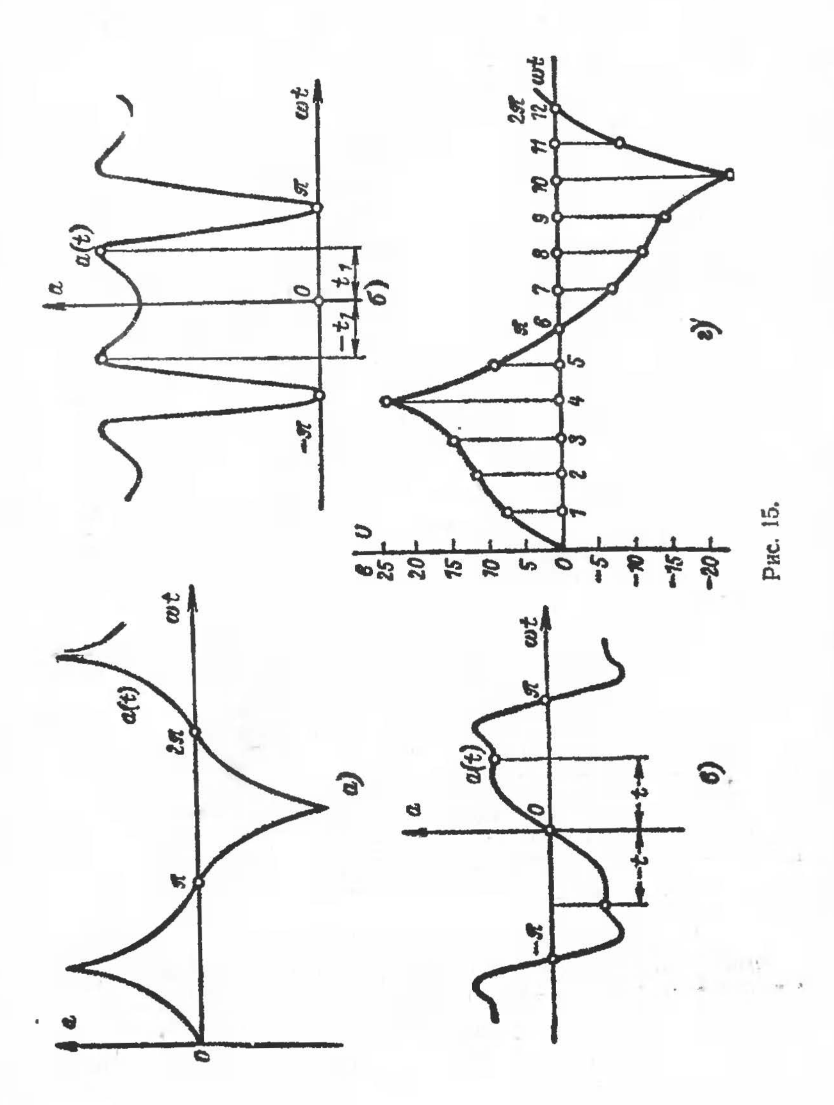


Рис. 14.



Если кривые, изображающие периодические несинусоидальные токи и напряжения, обладают симметрией, то им присущи некоторые специфические свойства. Кривые, симметричные относительно оси абсцисс ωt (рис. 15, *а*), не содержат постоянной составляющей и четных гармоник:

$$A_0 = A'_{2m} = A''_{2m} = A'_{4m} = A''_{4m} = \cdots = 0,$$

а поэтому для таких кривых

$$a(t) = A'_{1m} \sin \omega t + A''_{1m} \cos \omega t + A'_{3m} \sin 3\omega t + A''_{3m} \cos 3\omega t + \cdots \quad (80)$$

Кривые, симметричные относительно оси ординат a (рис. 15, *б*), не содержат синусоидальных составляющих

$$a(t) = A_0 + A''_{1m} \cos \omega t + A''_{2m} \cos 2\omega t + A''_{3m} \cos 3\omega t \ldots \quad (81)$$

Для кривых, симметричных относительно начала координат (рис. 15, *в*), разложение в ряд Фурье имеет вид:

$$a(t) = A'_{1m} \sin \omega t + A'_{2m} \sin 2\omega t + A'_{3m} \sin 3\omega t + \ldots; \quad (82)$$

$$A_0 = A''_{1m} = A''_{2m} = A''_{3m} = \cdots = 0.$$

Большое практическое значение имеет умение представить периодический несинусоидальный ток или напряжение в виде ряда Фурье. Это позволяет определить необходимую полосу пропускания устройства для неискаженной передачи сигнала, а также позволяет вести расчет цепей известными методами, применяемыми для синусоидальных токов. Кроме того, очень важно знать величину действующего (эффективного) значения несинусоидального тока или напряжения, среднее значение и величину постоянной составляющей. Расчетные формулы этих значений и ряды Фурье периодических несинусоидальных токов и напряжений геометрической формы, наиболее часто встречающиеся на практике (рис. 14), приведены в таблице.

Определение гармоник ряда Фурье для случая периодического несинусоидального тока любой формы можно произвести графо-аналитическим способом. Рассмотрим применение этого способа на конкретном примере. Имеется осциллограмма периодического несинусоидального напряжения (рис. 15, *г*), а также известны масштаб напряжения и период колебания.

Разобьем период на n равных частей, обычно 24, 18 или 12, определим величину напряжения для каждого участка периода и составим таблицу. Возьмем для нашего примера $n=12$; тогда получим:

p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f_p(u)$	7	12	15	25	9	0	—7	—12	—15	—25	—9	0

Амплитуды синусоидальной и косинусоидальной составляющей k-й гармоники подсчитываются по формулам

$$U'_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{n} f_p(u) \sin_p k \frac{2\pi}{n}; \quad (83)$$

$$U''_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{n} f_p(u) \cos_p k \frac{2\pi}{n}. \quad (84)$$

Разложение в ряд Фурье некоторых несинусоидальных токов правильной геометрической формы

Форма кривой	Разложение в ряд Фурье	Действующее значение тока	Среднее значение тока	Величина постоянной составляющей
Рис. 14, *а*	$a(t)=\frac{4A_m}{\pi}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{3}\cos 2\omega t-\frac{1}{15}\cos 4\omega t-\frac{1}{35}\cos 6\omega t-\cdots\right)$	$0{,}707A_m$	$0{,}637A_m$	$0{,}637A_m$
Рис. 14, *б*	$a(t)=\frac{2A_m}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{\pi}{4}\cos\omega t-\frac{1}{3}\cos 2\omega t-\frac{1}{15}\cos 4\omega t+\frac{1}{35}\cos 6\omega t-\cdots\right)$	$\frac{A_m}{2}$	$0{,}319A_m$	$0{,}319A_m$
Рис. 14, *в*	$a(t)=A_0+A_m\sin\omega t$	$\sqrt{A_0^2+\left(\frac{A_m}{\sqrt{2}}\right)^2}$	$A_0+0{,}637A_m$	A_0
Рис. 14, *г*	$a(t)=\frac{8A_m}{\pi^2}\left(\sin\omega t-\frac{1}{9}\sin 3\omega t+\frac{1}{25}\sin 5\omega t-\frac{1}{49}\sin 7\omega t+\cdots\right)$	$0{,}58A_m$	$\frac{A_m}{2}$	0
Рис. 14, *д*	$a(t)=\frac{4A_m}{\alpha\pi}\left(\sin\alpha\sin\omega t+\frac{1}{9}\sin 3\alpha\sin 3\omega t+\frac{1}{25}\sin 5\alpha\sin 5\omega t+\cdots\right)$	$A_m\sqrt{\frac{t_{на}}{T}\left(\frac{4}{3}-\frac{t_и}{3t_{на}}\right)}$	$A_m\frac{t_{на}}{T}$	0
Рис. 14, *е*	$a(t)=\frac{4A_m}{\pi}\left(\sin\frac{\alpha\pi}{2}\cos\omega t+\frac{1}{3}\sin\frac{3\alpha\pi}{2}\cos 3\omega t+\frac{1}{5}\sin\frac{5\alpha\pi}{2}\cos 5\omega t+\cdots\right)$	$A_m\sqrt{\frac{2t_и}{T}}$	$A_m\frac{2t_и}{T}$	0
Рис. 14, *ж*	$a(t)=\frac{2A_m}{\pi}\left(\frac{\pi t_и}{2T}+\sin\frac{\omega t_и}{2}\cos\omega t+\frac{1}{2}\sin\omega t_и\cos 2\omega t+\frac{1}{3}\sin\frac{3\omega t_и}{2}\cos 3\omega t+\cdots\right)$	$A_m\sqrt{\frac{t_и}{T}}$	$A_m\frac{t_и}{T}$	$A_m\frac{t_и}{T}$
Рис. 14, *з*	$a(t)=\frac{4A_m}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots\right)$	A_m	A_m	0
Рис. 14, *и*	$a(t)=\frac{4A_m}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\sin\omega t-\frac{1}{2}\sin 2\omega t-\frac{1}{3}\sin 3\omega t-\cdots\right)$	$0{,}58A_m$	$\frac{A_m}{2}$	$\frac{A_m}{2}$
Рис. 14, *к*	$a(t)=4A_m\left(\sin\omega t-\frac{1}{2}\sin 2\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t-\frac{1}{4}\sin 4\omega t+\cdots\right)$	$1{,}16A_m$	$\frac{A_m}{2}$	0

Величина постоянной составляющей определяется по формуле

$$U_0 = \frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(u). \tag{85}$$

В формулах (83), (84), (85) $f_p(u)$ — значение напряжения (тока) для каждой n-й части периода; k — номер гармоники.

Из осциллограммы видно, что кривая (рис. 15, *г*) симметрична относительно оси абсцисс и согласно (80) разложение будет иметь вид:

$$u(t) = U'_{1m}\sin\omega t + U''_{1m}\cos\omega t + U'_{3m}\sin 3\omega t + U''_{3m}\cos 3\omega t + \cdots,$$

тогда на основании формул (83), (84) имеем:

$$U'_{1m} = \frac{2}{12}\sum_{p=1}^{12} f_p(u)\sin_p k\frac{2\pi}{n} = \frac{4}{12}\sum_{p=1}^{6} f_p(u)\sin_p k\frac{2\pi}{n} =$$

$$= \frac{1}{3}(7\sin 30^\circ + 12\sin 60^\circ + 15\sin 90^\circ + 25\sin 120^\circ + 9\sin 150^\circ +$$

$$+ 0\sin 180^\circ) = \frac{1}{3}(3{,}5 + 10{,}2 + 15 + 21{,}2 + 4{,}5 + 0) = 18{,}12 \ \text{в};$$

$$U''_{1m} = \frac{4}{12}\sum_{p=1}^{6} f_p(u)\cos_p k\frac{2\pi}{n} = \frac{1}{3}(7\cos 30^\circ + 12\cos 60^\circ +$$

$$+ 15\cos 90^\circ + 25\cos 120^\circ + 9\cos 150^\circ + 0\cos 180^\circ) =$$

$$= \frac{1}{3}(6 + 6 + 0 - 12{,}5 - 7{,}7 + 0) = -2{,}72 \ \text{в}.$$

Соответственно

$$U'_{3m} = \frac{1}{3}(7\sin 90^\circ + 12\sin 180^\circ + 15\sin 270^\circ + 25\sin 360^\circ +$$

$$+ 9\sin 450^\circ + 0\sin 540^\circ) = \frac{1}{3}(7 + 0 - 15 + 0 + 9 + 0) =$$

$$= \frac{1}{3} = 0{,}33 \ \text{в};$$

$$U''_{3m} = \frac{1}{3}(7\cos 90^\circ + 12\cos 180^\circ + 15\cos 270^\circ + 25\cos 360^\circ +$$

$$+ 9\cos 450^\circ + 0\cos 540^\circ) = \frac{1}{3}(0 - 12 + 0 + 25 + 0 + 0) =$$

$$= \frac{13}{3} = 4{,}32 \ \text{в}.$$

В ряде случаев амплитуды составляющих быстро убывают с увеличением номера гармоники и можно ограничить расчет до третьей гармоники.

Таким образом, для кривой (рис. 15, *г*) можно записать:

$$u(t) \approx 18{,}12\sin\frac{2\pi}{T}t - 2{,}72\cos\frac{2\pi}{T}t + 0{,}33\sin 3\frac{2\pi}{T}t +$$

$$+ 4{,}32\cos 3\frac{2\pi}{T}t,$$

где T — период функции, *сек*.

Воспользуемся формулой (79), тогда

$$U_{1m} = \sqrt{(U'_{1m})^2 + (U''_{1m})^2} = \sqrt{18{,}12^2 + (-2{,}72)^2} = 18{,}4 \ \text{в};$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg}\frac{U''_{1m}}{U'_{1m}} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{2{,}72}{18{,}12}\right) = -\operatorname{arctg} 0{,}149 = -8^\circ 30';$$

$$U_{3m} = \sqrt{(U'_{3m})^2 + (U''_{3m})^2} = \sqrt{0{,}33^2 + 4{,}32^2} = 4{,}33 \ \text{в};$$

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} = \frac{U''_{3m}}{U'_{3m}} = \operatorname{arctg}\frac{4{,}33}{0{,}33} = \operatorname{arctg} 13{,}5 = 85^\circ 40'.$$

Ряд Фурье для рассматриваемой кривой будет иметь вид:

$$u(t) = 18{,}4\sin\left(\frac{2\pi}{T}t - 8^\circ 30'\right) + 4{,}33\sin\left(3\frac{2\pi}{T}t + 85^\circ 40'\right).$$

При построении графиков гармонических составляющих в координатных осях исследуемого напряжения необходимо учитывать углы сдвига фаз (φ). Если угол φ — отрицательный, то кривая гармоники сдвигается вправо от нуля, а если положительный — влево, с учетом масштаба по оси абсцисс. Для второй гармоники масштаб должен быть в 2 раза больше, для третьей в 3 раза и т. д. по сравнению с масштабом исследуемого напряжения.

Действующее значение периодического несинусоидального тока определяется по формуле

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots}; \tag{86}$$

где I_0 — постоянная составляющая;

$I_1, I_2, I_3 \ldots$ — действующие значения тока гармонических составляющих, определяемые по формуле

$$I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_{km}. \tag{87}$$

Соответственно для напряжения

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots}. \tag{88}$$

$$U_k = 0{,}707\ U_{km}. \tag{89}$$

Действующие значения тока и напряжения от сдвигов фаз φ не зависят.

Определим действующее напряжение по данным нашего примера, имеем $U_{1m}=18{,}4$ *в*; $U_{3m}=4{,}33$ *в*, тогда согласно (89) $U_1=0{,}707\cdot 18{,}4=13$ *в*, $U_3=0{,}707\cdot 4{,}33=3{,}08$ *в*, откуда

$$U=\sqrt{13^2+3{,}08^2}=13{,}35\ в.$$

Рассмотрим пример расчета цепи под воздействием периодического несинусоидального напряжения.

Цепь состоит из последовательно соединенных активного сопротивления $R=300$ *ом*, индуктивности $L=50$ *мгн* и емкости $C=0{,}1$ *мкф*. Напряжение на зажимах цепи

$$u=32\sin\omega t+7{,}5\sin(3\omega t+28^\circ)+3{,}8\sin(5\omega t-43^\circ)\ в,$$

частота $\omega=2\,512$ *рад/сек*.

Определить действующие значения напряжения и тока, активную мощность.

Вычислим реактивные и полные сопротивления для частот ω, 3ω, 5ω:

$$X_{L1}=\omega L=2\,512\cdot 0{,}05=125{,}6\ ом;$$

$$X_{L3}=3\omega L=3\cdot 2\,512\cdot 0{,}05=376{,}8\ ом;$$

$$X_{L5}=5\omega L=5\cdot 2\,512\cdot 0{,}05=628\ ом;$$

$$X_{C1}=\frac{1}{\omega C}=\frac{10^6}{2\,512\cdot 0{,}1}=3\,960\ ом;$$

$$X_{C3}=\frac{1}{3\omega C}=\frac{10^6}{3\cdot 2\,512\cdot 0{,}1}=1\,320\ ом;$$

$$X_{C5}=\frac{1}{5\omega C}=\frac{10^6}{5\cdot 2\,512\cdot 0{,}1}=792\ ом;$$

$$Z_1=\sqrt{R^2+(X_{L1}-X_{C1})^2}=\sqrt{300^2+(125{,}6-3\,960)^2}=3\,930\ ом;$$

$$Z_3=\sqrt{R^2+(X_{L3}-X_{C3})^2}=\sqrt{300^2+(376{,}8-1\,320)^2}=985\ ом;$$

$$Z_5=\sqrt{R^2+(X_{L5}-X_{C5})^2}=\sqrt{300^2+(628-792)^2}=342\ ом.$$

Определим амплитуды отдельных гармоник тока:

$$I_{1m}=\frac{U_{1m}}{Z_1}=\frac{32}{3\,930}=0{,}00815a=8{,}15\ ма;$$

$$I_{3m}=\frac{U_{3m}}{Z_3}=\frac{7{,}5}{985}=0{,}0076a=7{,}6\ ма;$$

$$I_{5m}=\frac{U_{5m}}{Z_5}=\frac{3{,}8}{342}=0{,}0111a=11{,}1\ ма.$$

Вычислим действующие значения напряжения и тока:

$$U=\sqrt{U_1^2+U_3^2+U_5^2}=\sqrt{\left(\frac{32}{\sqrt2}\right)^2+\left(\frac{7{,}5}{\sqrt2}\right)^2+\left(\frac{3{,}8}{\sqrt2}\right)^2}=23\ в;$$

$$I=\sqrt{I_1^2+I_3^2+I_5^2}=\sqrt{\left(\frac{8{,}15}{\sqrt2}\right)^2+\left(\frac{7{,}6}{\sqrt2}\right)^2+\left(\frac{11{,}1}{\sqrt2}\right)^2}=$$

$$=11{,}2\ ма.$$

Определяем активную мощность:

$$P=U_1I_1\cos\varphi_1+U_3I_3\cos\varphi_3+U_5I_5\cos\varphi_5=$$

$$=\frac{32}{\sqrt2}\cdot\frac{8{,}15\cdot 10^{-3}}{\sqrt2}\cdot\frac{300}{3\,930}+\frac{7{,}5}{\sqrt2}\cdot\frac{7{,}6\cdot 10^{-3}}{\sqrt2}\cdot\frac{300}{985}+$$

$$+\frac{3{,}8}{\sqrt2}\cdot\frac{11{,}1\cdot 10^{-3}}{\sqrt2}\cdot\frac{300}{342}=0{,}0375\ вт=37{,}5\ мвт.$$

Такой же результат получится, если активную мощность подсчитать по формуле

$$P=I^2R=(11{,}2\cdot 10^{-3})^2\cdot 300=0{,}0375\ вт=37{,}5\ мвт.$$

Задачи

2-16. Определить величину постоянной составляющей и амплитуды напряжения второй, четвертой и шестой гармоник несинусоидального напряжения (рис. 14, *а*), если $U_m=12$ *в*.

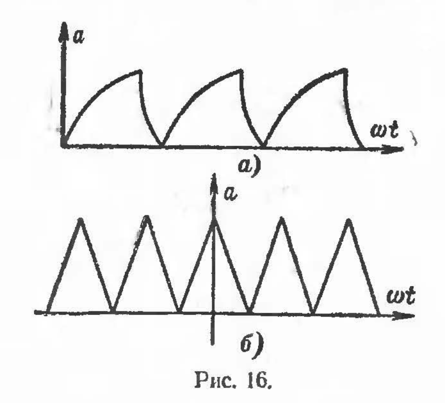


Рис. 16.

2-17. Записать ряд Фурье для несинусоидального тока (рис. 14, *б*), если $I_m=0{,}134$ *а*, $T=0{,}00628$ *сек*.

2-18. Разложить в ряд Фурье графо-аналитическим способом несинусоидальное напряжение (рис. 15, *а*), если масштаб напряжения $m_u=2$ *в/мм*, а $T=0{,}02$ *сек*.

2-19. Разложить в ряд Фурье графо-аналитическим способом несинусоидальное напряжение (рис. 15, *б*), если масштаб напряжения $m_u=3$ *в/мм*, а $f=800$ *гц*.

2-20. В цепи с последовательно включенными активным сопротивлением $R=2$ *ом* и емкостью $C=100$ *мкф* протекает ток $i=2\sin\left(500t+\frac{\pi}{3}\right)+2\sin 1000t$, *а*. Определить действующее значение напряжения на конденсаторе.

2-21. К зажимам цепи, состоящей из последовательно включенных активного сопротивления $R=100$ *ом*, индуктивности $L=0{,}08$ *гн* и емкости $C=0{,}5$ *мкф* приложено напряжение

$$u = 25 \sin \omega t + 6 \sin(3\,\omega t + 55°),\ \textit{в}.$$

Определить действующие значения тока, напряжения и активную мощность в цепи. $\omega=1\,000$ *рад/сек.*

2-22. Определить амплитуды и частоты третьей и пятой гармоник несинусоидального напряжения (рис. 14, *г*), если $U_m=20$ *в*, $T=0{,}0015$ *сек.*

2-23. Определить величину постоянной составляющей тока для несинусоидального напряжения (рис. 14, *и*), если $U_m=12$ *в*, а сопротивление цепи $R=30$ *ом*.

2-24. Записать ряды Фурье для несинусоидальных напряжений (рис. 16).

ОДИНОЧНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Радиотехнические колебательные системы преимущественно состоят из одиночных колебательных контуров (рис. 17).

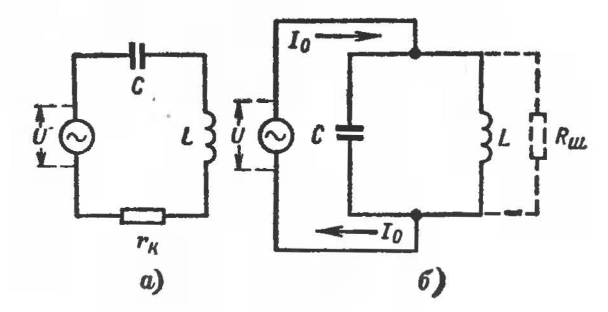


Рис. 17.

Параметры контура зависят от входящих в него элементов и определяются по следующим расчетным формулам.

Для последовательного и параллельного колебательных контуров

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \tag{90}$$

где ω_0 — круговая частота собственных колебаний, *1/сек*;
L — индуктивность катушки, *гн*;
C — емкость конденсатора, *ф*.

В радиолюбительской литературе приводятся формулы

$$f = \frac{159}{\sqrt{L_{\text{гн}} C_{\text{мкф}}}},\ \textit{гц}, \tag{91}$$

$$f = \frac{5\,033}{\sqrt{L_{\text{мгн}} C_{\text{пф}}}},\ \textit{кгц}. \tag{92}$$

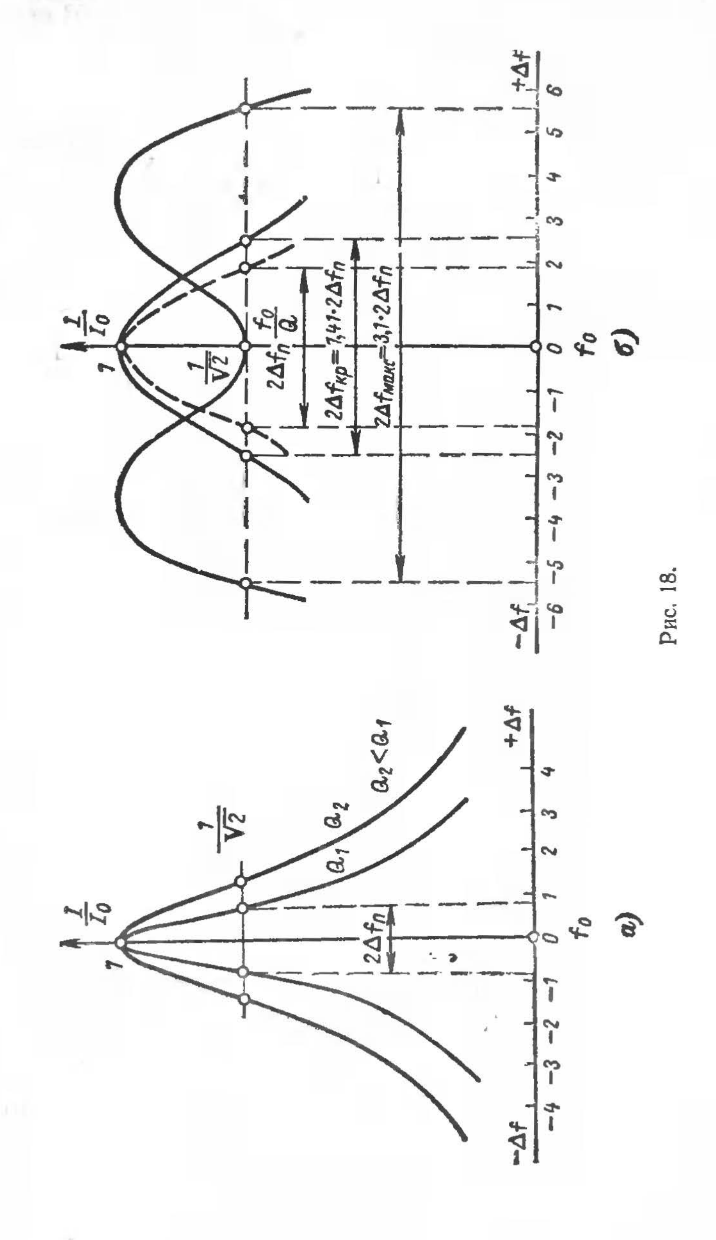


Рис. 18.

Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (93)$$

Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{r_к} = \frac{\omega_0 L}{r_к} = \frac{1}{\omega_0 C r_к}, \quad (94)$$

где $r_к$ — сопротивление потерь контура, *ом*.

Расстройка колебательного контура определяется по формуле

$$\Delta f = f - f_0. \quad (95)$$

Полоса пропускания контура, в пределах которой амплитуда колебаний уменьшается в 1,41 раза, определяется по формуле

$$2\Delta f_П = \frac{f_0}{Q}. \quad (96)$$

Резонансные кривые одиночного контура для разных значений Q даются на рис. 18, *а*.

При резонансе для последовательного контура (рис. 17, *а*)

$$Z_0 = r_к; \quad (97)$$

$$I_{к0} = \frac{U}{r_к}; \quad (98)$$

$$U_{L0} = -U_{C0} = I_{к0}\,\rho = U\frac{\rho}{r_к} = UQ. \quad (99)$$

При резонансе для параллельного контура (рис. 17, *б*)

$$R_э = \frac{\rho^2}{r_к} = Q\rho, \quad (100)$$

где $R_э$ — эквивалентное сопротивление контура, *ом*,

$$I_0 = \frac{U}{R_э} = \frac{U}{\rho Q}, \quad (101)$$

где I_0 — ток в цепи источника, когда контур настроен в резонанс;

$$I_{к0} = I_0 Q, \quad (102)$$

где $I_{к0}$ — ток в контуре, *а*.

Если параллельный контур зашунтировать сопротивлением $R_ш$ (рис. 17, б), то

$$R'_э = \frac{R_э R_ш}{R_э + R_ш} < R_э. \quad (103)$$

Эквивалентная добротность контура уменьшается, а полоса пропускания увеличивается.

Параллельные колебательные контуры, у которых в одной из ветвей последовательно включены катушка и конденсатор, а в другой ветви катушки или конденсатор, называются с л о ж н ы м и контурами (рис. 19).

В сложных колебательных контурах резонанс может возникать на двух различных частотах.

Для колебательного контура (рис. 19, *а*) частота последовательного резонанса определяется:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}, \quad (104)$$

а частота параллельного резонанса

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)\,C}}. \quad (105)$$

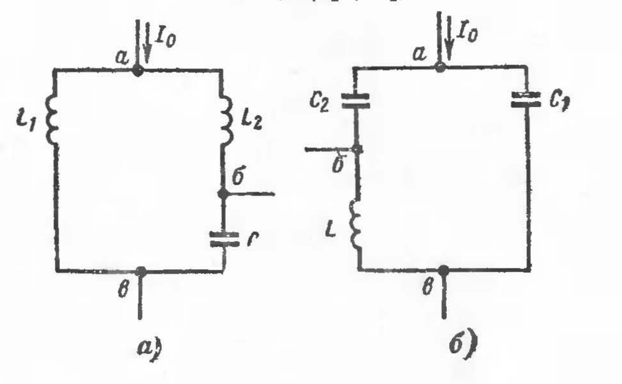


Рис. 19.

Из равенств (104), (105) следует:

$$\omega_1 = \omega_0\sqrt{1 + \frac{L_1}{L_2}} \quad (106)$$

или

$$\omega_1 = \omega_0\sqrt{\frac{1}{1-p}}, \quad (107)$$

где $p = \dfrac{L_1}{L_1 + L_2}$ — коэффициент включения контура.

Если L_1 и L_2 представляют две части одной катушки, то коэффициент p определяется формулой

$$p = \frac{L_1 + M}{L_1 + L_2 + 2M}, \quad (108)$$

где M — взаимная индукция.

При параллельном резонансе ($\omega = \omega_0$) эквивалентное сопротивление контура

$$R_{э2} = p^2\,\omega_0^2\frac{(L_1 + L_2)^2}{r_к} = p^2 R_э \quad (109)$$

и при $p<1$, $R_{э2}<R_{в}$, что широко используется на практике для согласования сопротивления контура с сопротивлением нагрузки. Соответственно для сложного колебательного контура с двумя конденсаторами (рис. 19, *б*) частота последовательного резонанса определяется:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_2}}, \qquad (110)$$

а частота параллельного резонанса

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L\,\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}. \qquad (111)$$

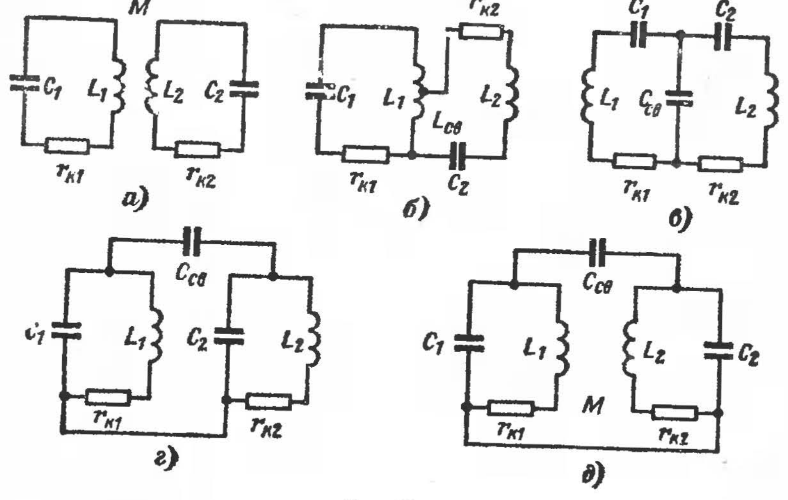


Рис. 20.

Из (109), (110)

$$\omega_0 = \omega_1\sqrt{\frac{C_1+C_2}{C_1}} \qquad (112)$$

или

$$\omega_0 = \omega_1\sqrt{\frac{1}{1-p}}, \qquad (113)$$

где

$$p = \frac{C_2}{C_1+C_2}.$$

Для контура с двумя конденсаторами при параллельном резонансе ($\omega=\omega_0$) справедлива формула (109).

Колебательные контуры, в которых энергия из одного контура передается в другой, называются связанными и образуют колебательную систему. Контуры могут быть связаны между собой различными способами (рис. 20).

Для системы связанных контуров характерно наличие нескольких резонансных частот. Так, например, система из двух достаточно сильно связанных одинаковых контуров ($L_1=L_2=L$; $C_1=C_2=C$) (рис. 20, *а*) имеет три резонансные частоты, определяемые формулами

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \qquad (114)$$

$$\omega_{1,2} \approx \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \dfrac{M}{L}}}, \qquad (115)$$

где ω_1 — нижняя частота связи, получаемая при $+\dfrac{M}{L}$;

ω_2 — верхняя частота связи при $-\dfrac{M}{L}$.

Коэффициент связи между контурами можно подсчитать по следующим формулам:

для индуктивной связи (рис. 20, *а*)

$$k_{св} = \frac{M}{L} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}; \qquad (116)$$

для автотрансформаторной связи (рис. 20, *б*)

$$K_{св} \approx \frac{L_{св}}{\sqrt{L_1(L_2+L_{св})}}; \qquad (117)$$

для емкостной связи (рис. 20, *в*)

$$K_{св} = \sqrt{\frac{C_1C_2}{(C_1+C_{св})(C_2+C_{св})}}, \qquad (118)$$

для емкостной (рис. 20, *г*)

$$K_{св} = \frac{C_2}{C_2+C_{св}}; \qquad (119)$$

для индуктивно-емкостной связи (рис. 20, *д*)

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} + \frac{C_2}{C_2+C_{св}}. \qquad (120)$$

Резонансные кривые системы из двух связанных контуров при разных значениях $K_{св}$ представлены на рис. 18, *б*.

Задачи

2-25. Определить добротность колебательного контура, если при измерениях оказалось, что $2\Delta f=6$ *кгц*, $f_0=465$ *кгц*.

2-26. Первичная обмотка трансформатора НЧ зашунтирована конденсатором 4 700 *пф*. Определить резонансную частоту образовавшегося параллельного контура, если индуктивность первичной обмотки $L=7$ *гн*.

2-27. Для определения индуктивности дросселя НЧ последовательно с ним соединили конденсатор емкостью 4 *мкф*. В образовавшемся последовательном колебательном контуре резонанс напряжения наступил при частоте 70 *гц*. Определить индуктивность дросселя.

2-28. Эквивалентное сопротивление контура равно 60 *ком*. Какой величины должно быть шунтирующее сопротивление, чтобы полоса пропускания контура увеличилась в 1,5 раза.

2-29. Определить индуктивность катушки фильтра промежуточной частоты, если промежуточная частота равна 465 *кгц*, а конденсатор контура 240 *пф*.

2-30. Определить, какой диапазон частот перекрывает контур, если емкость переменного конденсатора $15 \div 500$ *пф*, емкость подстроечного конденсатора 15 *пф*, емкость монтажа 30 *пф*, а индуктивность катушки равна 200 *мкгн*.

2-31. Определить емкость монтажа, если контур перекрывает диапазон частот 520—1 500 *кгц*, емкость переменного конденсатора $15 \div 490$ *пф* и $C_{пар}=10$ *пф* (емкость подстроечного конденсатора).

2-32. Рассчитать параметры $L_ф$, $C_ф$ заградительного фильтра магнитофона (рис. 21), если частота генератора подмагничивания 40 *кгц*, индуктивность головки $L=1$ *гн* (принять $L_ф=0{,}5\ L$). Какую величину должен иметь конденсатор C_0, чтобы контур C_0L был настроен на частоту генератора подмагничивания.

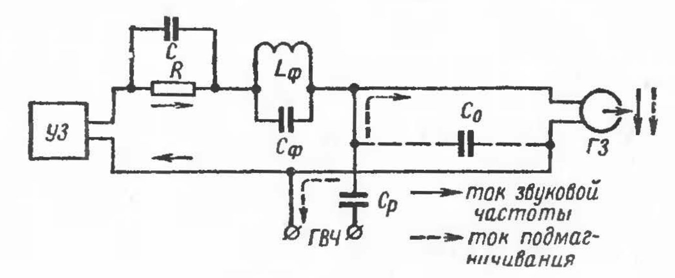


Рис. 21.

2-33. Рассчитать значение R и C (рис. 21), если усилитель записи магнитофона имеет полосу пропускания 100—6 000 *гц*.

Указания: расчет вести по формулам

$$R = \frac{\omega_в (L + L_ф)}{1{,}6};$$

$$C = \frac{1}{\omega_в^2 (L + L_ф)}.$$

Значение $L_ф$ из задачи 2-32.

2-34. Два связанных контура имеют $L_1=50$ *мкгн*, $L_2=30$ *мкгн*. Для автотрансформаторной связи определить $L_{св}$, если $K_{св}=5\%$.

2-35. Для задачи 2-34 определить число витков элемента связи для получения $K_{св}=10\%$, если известно, что $N_1=150$ витков.

2-36. Два контура с внутренней емкостной связью имеют $C_1=C_2=65$ *пф*. Определить $C_{св}$, если $K_{св}=1\%$.

2-37. Два одинаковых контура имеют параметры: $C_1=C_2=120$ *пф*, $L_1=L_2=250$ *мкгн*, $r_{к1}=r_{к2}=5$ *ом*. Определить полосу пропускания каждого контура в отдельности и полосу пропускания при критической связи.

2-38. Определить возможную наибольшую полосу пропускания двух связанных контуров по данным задачи 2-37 (см. рис. 18).

2-39. Сложный колебательный контур (рис. 19,*а*) имеет параметры $L_1=100$ *мкгн*, $L_2=200$ *мкгн*, $C=300$ *пф*. Определить частоты резонанса напряжений и резонанса токов, а также коэффициент включения катушки.

2-40. Сложный колебательный контур с двумя емкостями имеет параметры $L=500$ *мкгн*, $C_1=150$ *пф*, $C_2=240$ *пф*. Определить частоты резонанса напряжений и резонанса токов, а также коэффициент включения контура (рис. 19, *б*).

2-41. Определить оптимальный коэффициент включения контура, если $R_i=5$ *ком*, а $R_э=30$ *ком*.

Глава третья

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

СОСТАВЛЕНИЕ БЛОК-СХЕМЫ ПРИБОРА

Исходными данными при составлении блок-схемы являются технические требования (условия), которым должен отвечать данный прибор. Обычно радиолюбитель является одновременно заказчиком, разработчиком и изготовителем того или иного прибора, а поэтому в первую очередь необходимо уметь составить технические условия на разрабатываемый прибор.

В технические условия включается полное наименование прибора и его назначение, основные параметры (выходная мощность, чувствительность, точность измерений и др.), условия эксплуатации (температура окружающей среды, влажность, воздействие вибраций и др.), конструктивное оформление (стационарный, переносной, транспортируемый), вес, источники питания. Кроме того, в технические условия включаются дополнительные требования, являющиеся специфическими для данного прибора.

В зависимости от квалификации радиолюбителя и его технических возможностей один и тот же прибор может быть выполнен по различным схемам; однако в любом случае необходимо найти такой вариант, при котором схема была бы наиболее простой, содержала минимальное количество узлов и элементов, но не в ущерб техническим и эксплуатационным характеристикам.

На блок-схеме изображаются все основные функциональные узлы и связи между ними с помощью специальных условных обозначений.

Задачи

3-1. Разработать блок-схему электронного бесконтактного виброметра.

Технические условия:

1) Виброметр предназначен для измерения амплитуды и частоты вибрации различных машин и механизмов.
2) Диапазон частоты вибрации 10—30 *кгц*.
3) Амплитуда вибрации 0—100 *мк*.
4) Материал вибрирующего объекта — любой металл.
5) Точность измерения:
   частоты вибрации ±3%;
   амплитуды вибрации ±2%.
6) Среда, в которой может работать датчик прибора — воздух—жидкость.
7) Датчик должен иметь габариты:
   длина не более 100 *мм*;
   диаметр не более 20 *мм*.
8) Длина соединительного кабеля вибродатчика 1,5—2 *м*.
9) Условия эксплуатации:
   температура окружающей среды — 10—+40° С;
   давление — нормальное.
10) Конструкция переносная, вес не более 5 *кг* без источников питания.
11) Питание универсальное от сети переменного тока напряжением 220 *в* ±10%, частотой 50 *гц* и от батарей.
12) Дополнительные требования. Виброметр должен иметь выход для подключения электронного осциллографа для визуального наблюдения колебаний.

3-2. Разработать электронную блок-схему сигнализатора уровня воды в паровом котле.

1) Сигнализатор уровня воды в паровом котле предназначен для сигнализации об уменьшении уровня воды ниже допустимого и автоматического включения насоса, а также для сигнализации о превышении уровня воды и автоматического выключения насоса.
2) Датчиком уровня может служить непрозрачный поплавок, помещенный в водомерную стеклянную трубку. Перемещение поплавка из крайнего верхнего положения (котел наполнен) до крайнего нижнего положения (уровень ниже допустимого) —30 *мм*.
3) Время срабатывания устройства с момента достижения поплавком верхнего или нижнего уровня не более 1 *сек*.
4) Надежность устройства $P(1\,000) \leqslant 0{,}98$. В приборе должна быть предусмотрена сигнализация о его отказе.
5) Условия эксплуатации:
   температура окружающей среды +10—+50° С;
   давление — нормальное.
6) Конструкция стационарная.
   Индикатор прибора должен располагаться на расстоянии 10 *м* от датчика. Вес индикатора не ограничен.
7) Питание — сеть переменного тока частотой 50 *гц* и напряжением 220 *в* ±10%.
8) Дополнительные требования. Схема управления прибора должна быть рассчитана на коммутацию переменного тока (50 *гц*, 380 *в*, 2,5 *а*).

3-3. Разработать блок-схему многоточечного электронного измерителя температуры.

Технические условия:

1) Многоточечный электронный измеритель температуры предназначен для автоматического измерения и фиксации температуры при лабораторных исследованиях.
2) Количество точек контроля температуры — 25.
3) Диапазон измеряемых температур 20—60° С.
4) Точность измерения и фиксации ±0,5° С.
5) Время одного цикла измерения (по очереди в каждой из 25 точек) и фиксации результатов не более 2 *мин*.
6) Режим работы — длительный.
7) В качестве датчиков использовать терморезисторы КТМ-14.
8) Расстояние между прибором и объектами измерения не более 3 *м*.
9) Условия эксплуатации — нормальные.
10) Конструкция — транспортируемая на передвижном столике. Вес не более 50 *кг*.
11) Питание от сети переменного тока частотой 50 *гц* и напряжением 220 *в* ±10%.
12) Дополнительные требования. Предусмотреть полуавтоматический контроль исправности прибора с помощью встроенной системы контроля.

3-4. Разработать блок-схему электронного «экзаменатора».

Технические условия:

1) Электронный «экзаменатор» предназначен для контроля и оценки знаний учащихся с учетом фактора времени, затраченного на ответы.
2) Количество билетов (вопросов) — 10.
   Предусмотреть индикацию билета, на который производится ответ (подсветка билета, индикаторная лампочка с номером билета и т. п.).
3) В каждом билете имеется четыре ответа: верный, верный, но не точный и два неверных. За выбор верного ответа отвечаемый получает 3 очка, верного, но не точного — 2 очка. За неверные ответы — 0 очков. Одновременно с фиксацией выбранного ответа должен автоматически включаться следующий билет.
4) «Экзаменатор» должен учитывать время, затраченное на ответы, а также автоматически переключать билеты, если ответ на билет не последовал в течение одной минуты.
   Если учащийся затратил на все десять ответов не более 5 *мин*, то ему автоматически добавляется 2 очка, не более 7 *мин* — 1 очко.
5) Оценка ответа производится по пятибальной системе, причем оценка «отлично» («5») дается при наборе не менее 30 очков, «хорошо» («4») — не менее 25 очков, «удовлетворительно» («3») — не менее 20 очков, «неудовлетворительно» («2») — менее 20 очков. В общую сумму очков входят поощрительные очки за быстроту ответов.

6) «Экзаменатор» должен иметь устройство для приведения его в исходное состояние («сброс на нуль»).
7) Конструкция стационарная. Условия эксплуатации нормальные.
8) Питание от сети переменного тока частотой 50 *гц* и напряжением 220 *в* ±10%.
9) Дополнительные требования. Индикацию оценки ответов выполнить на индикаторной лампе ИН-1. Количество реле и подвижных механических переключателей должно быть минимальным.

РАСЧЕТ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Конструктивный расчет конденсатора переменной емкости с воздушным диэлектриком и с произвольным (отличным от стандартных)

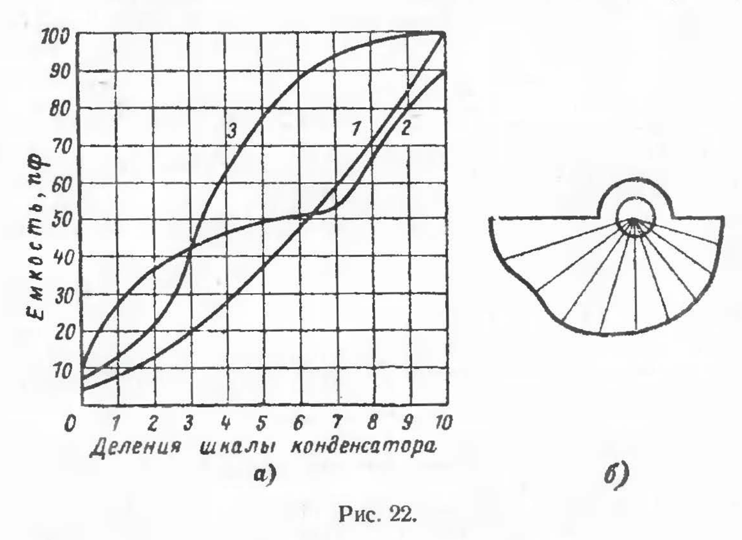


Рис. 22.

законом изменения емкости может быть произведен графо-аналитическим способом с достаточной для практики точностью.

Пусть требуется рассчитать конденсатор, закон изменения емкости которого задан кривой *1* (рис. 22, *а*). Разобьем кривую на m (10—20) равных по углу поворота участков. В пределах каждого участка можно считать, что изменение емкости происходит по прямолинейному закону и средний радиус ротора (R_i) на этом участке будет равен:

$$R_i = \sqrt{A\Delta C_i + r_0^2}, \qquad (121)$$

где ΔC_i — изменение емкости на этом участке, *пф*;
r_0 — радиус выреза на пластинах статора для оси ротора, *мм*;
A — постоянная для данного конденсатора.

Для определения постоянной A из конструктивных соображений задаются максимальным радиусом пластин ротора ($R_{макс}$) для последнего участка кривой емкости и определяют A по формуле

$$A = \frac{R_{макс}^2 - r_0^2}{\Delta C_m}, \qquad (122)$$

где ΔC_m — изменение емкости на последнем участке, *пф*.

Максимальный радиус необходимо выбрать так, чтобы общее число пластин n ротора и статора было целым числом

$$n = \frac{7{,}2 \cdot md}{A} + 1, \qquad (123)$$

где m — число участков, на которые разбита кривая емкости;
d — расстояние между пластинами ротора и статора, *мм*; обычно d выбирается в пределах 1,0—2 *мм*, из конструктивных соображений.

Расчет радиусов остальных участков ведется по формуле (121).

Пример. Рассчитать конденсатор, закон изменения емкости которого задан кривой *1* (рис. 22, *а*).

1) Разобьем кривую емкости на десять участков ($m=10$) и определим изменением емкости на каждом из них; величину ΔC_i для каждого участка внесем в расчетную таблицу.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔC_i, *пф*	5	5	7	8	9	9	11	13	12	15,6
R_i, *мм*	12,1	12,1	13,9	14,7	15,5	15,5	17	18,3	17,7	20,0

2) Зададимся максимальным радиусом, радиусом выреза на статоре и расстоянием между пластинами:

$$R_{макс} = 20 \text{ мм};$$
$$r_0 = 5{,}0 \text{ мм};$$
$$d = 1{,}0 \text{ мм}.$$

3) Определим величину A:

$$A = \frac{R_{макс}^2 - r_0^2}{\Delta C_{10}} = \frac{20^2 - 5^2}{15{,}6} \approx 24.$$

4) Проверим, получается ли при $A=24$ количество пластин целым числом:

$$n = \frac{7{,}2 \cdot md}{A} + 1 = \frac{7{,}2 \cdot 10 \cdot 1}{24} + 1 = 4,$$

n ротора равно 2, n статора равно 2;

5) По формуле (121) определим средние радиусы пластин ротора для остальных участков и полученные результаты занесем в таблицу. Так, для первого участка

$$R_1 = \sqrt{24 \cdot 5 + 5^2} = \sqrt{145} \approx 12,1 \text{ мм};$$

аналогично рассчитываются радиусы $R_2, R_3, \ldots, R_9$.

6) Вычерчиваем чертеж пластины ротора (рис. 22, *б*); пластины статора могут иметь произвольную форму при условии, что они полностью покрывают пластины ротора.

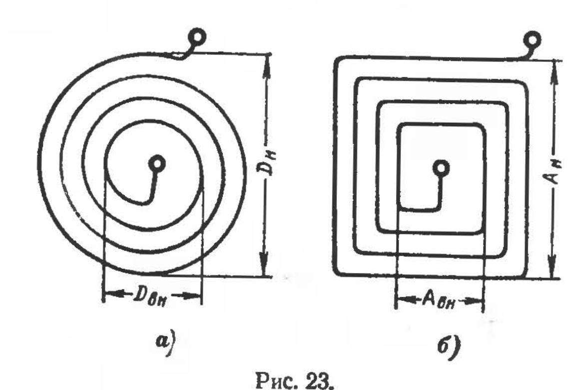


Рис. 23.

Для работы в УКВ диапазоне с успехом могут применяться печатные катушки индуктивности (рис. 23). Добротность таких катушек $Q = 70 \div 100$, а количество витков $N = 3 \div 15$. Расчет индуктивности печатных катушек производится по формулам для спиральной катушки (рис. 23, *а*)

$$L = 4,97 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ср} \sqrt[3]{N^5} \lg 8 \frac{r_{ср}}{c}, \qquad (124)$$

для квадратной катушки (рис. 23, *б*)

$$L = 5,55 \cdot 10^{-3} a_{ср} \sqrt[3]{N^5} \lg 8 \frac{a_{ср}}{c}; \qquad (125)$$

в формулах (124), (125)

L — индуктивность катушки, *мкгн*;

$r_{ср} = \dfrac{D_н + D_{вн}}{4}$ — средний радиус, *мм*;

$a_{ср} = \dfrac{A_н + A_{вн}}{4}$ — средняя сторона квадрата, *мм*;

$c = \dfrac{D_н - D_{вн}}{2} = \dfrac{A_н - A_{вн}}{2}$ — средняя ширина, *мм*.

Задачи

3-5. Рассчитать и построить пластину ротора для конденсатора с изменением емкости: а) по кривой *2*, б) по кривой *3*, рис. 22, *а*.

3-6. Рассчитать индуктивность плоской печатной спиральной катушки, если $D_{вн} = 8$ *мм*, $D_н = 18$ *мм*, $N = 10$.

3-7. Рассчитать конструктивные размеры плоской печатной квадратной катушки $L = 0,5$ *мкгн*, $A_н \leqslant 16$ *мм*.

3-8. Рассчитать конструктивные размеры плоской печатной спиральной катушки $L = 2$ *мкгн*, $D_н \leqslant 20$ *мм*.

Глава четвертая

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Абсолютной погрешностью (ошибкой) измерения называется разность между измеренной и действительной величиной

$$\Delta A = A_{изм} - A_{действ}. \qquad (140)$$

Абсолютные погрешности приборов исключаются введением поправок δ, которые определяются при периодической проверке прибора, и прилагаются в виде таблиц или графиков. Поправка должна быть равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком

$$\delta = -\Delta A.$$

Введением поправок исключаются систематические погрешности, обусловленные несовершенством измерительных приборов, влиянием определенных внешних факторов, например температуры, неудачной схемой измерения и т. п.

Относительной погрешностью измерения называется отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Относительная погрешность выражается в процентах и подсчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_{действ}} \cdot 100\%. \qquad (141)$$

Приведенной относительной погрешностью называется отношение наибольшей абсолютной погрешности к верхнему пределу шкалы прибора $A_{приб}$

$$\gamma_{пр} = \frac{\Delta A_{макс}}{A_{приб}} 100\%. \qquad (142)$$

По величине приведенной относительной погрешности определяется класс точности прибора. Электроизмерительные стрелочные приборы выпускаются восьми классов точности 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности указывается на шкале прибора. Если необходимо измерить какую-либо величину с повышенной точностью, то одно и то же измерение повторяют несколько раз и находят среднее показание:

$$A_{ср} = \frac{A_1 + A_2 + \cdots + A_n}{n}. \qquad (143)$$

Разности между результатом каждого измерения и средним показанием называются **остаточными погрешностями** и подсчитываются по формулам

$$\left.\begin{aligned} \alpha_1 &= A_1 - A_{ср}; \\ \alpha_2 &= A_2 - A_{ср}; \\ &\cdots\cdots \\ \alpha_n &= A_n - A_{ср}. \end{aligned}\right\} \qquad (144)$$

Зная остаточные погрешности, можно вычислить **среднюю квадратичную погрешность** по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \cdots + \alpha_n^2}{n-1}}. \qquad (145)$$

В формулах (143)—(145) n — число измерений; обычно $n \geqslant 10$. Определение среднего значения и средней квадратичной погрешности позволяет исключить случайные погрешности измерений, которые выявляются при многократном измерении одной и той же величины.

Действительное значение измеряемой величины определяют по формуле

$$A_д = A_{ср} + \delta \pm 3\sigma, \qquad (146)$$

где 3σ * — предельная погрешность.

Вероятное значение измеряемых величин находят по формуле

$$A_в = A_{ср} + \delta \pm 2/3\sigma, \qquad (147)$$

где $2/3\sigma$ — наиболее вероятная погрешность.

При измерениях напряжений и токов в электрических цепях необходимо учитывать погрешности, которые возникают за счет изменений, вносимых входным сопротивлением вольтметра или внутренним сопротивлением амперметра в измеряемую цепь.

Для широко распространенных в радиолюбительской практике тестеров и авометров входное сопротивление вольтметра характеризуется величиной входного сопротивления на 1 *в* шкалы. Эта величина остается постоянной на всех пределах измерения и колеблется в зависимости от типа прибора от 2 000 до 20 000 *ом/в*. Полное входное сопротивление $R_{вх}$ зависит от верхнего предела используемой шкалы прибора. На практике влияние $R_{вх}$ следует учитывать при измерении анодных и экранных напряжений в ламповых схемах, так как в большинстве случаев входное сопротивление авометра оказывается недостаточно высоким[1]. Включение амперметра (миллиамперметра, микроамперметра) увеличивает общее сопротивление цепи на величину внутреннего сопротивления прибора, а поэтому измеренный ток будет меньше действительного тока, протекающего в цепи. На практике влияние $R_{вн}$ амперметра следует учитывать при измерении тока в цепях, где сопротивление цепи соизмеримо с $R_{вн}$ прибора, например в транзисторных схемах.

* В теории вероятностей доказывается, что погрешность измерения, превышающая величину 3σ, встречается в среднем только в одном из 370 случаев измерения, а поэтому для вычисления наиболее вероятного значения измеряемой величины пользуются формулой (147).

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При измерении периодических несинусоидальных напряжений показания ламповых вольтметров переменного тока зависят от типа детектора и градуировки шкалы.

Пиковые (амплитудные) детекторы обеспечивают на выходе напряжение, равное амплитуде напряжения на его входе. Пиковые детекторы с закрытым входом (имеется разделительный конденсатор) реагируют только на переменные токи.

Квадратичные детекторы имеют на выходе напряжение, пропорциональное действующему (эффективному) значению напряжения на входе.

Шкалы вольтметров переменного тока градуируются в действующих значениях синусоидального напряжения, а шкалы импульсных вольтметров в пиковых значениях.

При измерении синусоидальных напряжений вольтметрами переменного тока необходимо знать форму кривой и характеристику вольтметра, которые приводятся в описаниях прибора.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты многих радиоэлектронных измерений наиболее естественно представлять в виде графиков. Правильно построенные графики отличаются большой наглядностью, легко анализируются и могут служить исходным материалом для дальнейших расчетов.

Обычно графики строятся на основании таблиц, куда тщательно заносятся все результаты измерений. Для записи результатов расчетов в таблице должны предусматриваться свободные графы. В качестве примера приведем форму таблицы для записи измерений частотной характеристики УНЧ. В таблице первые три графы заполняются по показаниям измерительных приборов, а остальные графы после расчетов.

Когда таблица заполнена, необходимо выбрать масштаб будущего графика. Если кривая незначительно отклоняется от среднего значения, то масштаб можно брать мелким, если же требуется под-

[1] Очень часто в публикуемых схемах указано, что режимы измерены авометром определенного типа. Это значит, что на схеме указаны не действительные напряжения и токи, а полученные для параметров цепи, измененных за счет сопротивлений, вносимых прибором.

Результаты измерений частотной характеристики УНЧ

Генератор ГЗ-34 № . . . $P_{400} = 0{,}25 P_{\text{вых. макс}}$

Вольтметр ВЗ-10 № . . . $U_{\text{сети}} = 220\ в \pm 2\ \%$

F, гц	$U_{вх}$, в	$U_{вых}$, в	$\frac{U_{вых}}{U_{вых\ 400}}$	дб	Примечание
100	0,1	0,57	0,38	—8,5	Регуляторы тембра в крайнем левом положении
200	0,1	1,17	0,78	—2,3	
300	0,1	1,47	0,98	—0,2	
400	0,1	1,5	1,0	0	
600	0,1	1,5	1,0	0	
800	0,1	1,5	1,0	0	
1000	0,1	1,5	1,0	0	
2000	0,1	1,5	1,0	0	
3000	0,1	1,35	0,9	—0,9	
4000	0,1	1,18	0,79	—2,0	
5000	0,1	0,9	0,6	—4,4	
6000	0,1	0,57	0,38	—8,5	
100	0,1	2,25	1,5	+3,6	Регуляторы тембра в крайнем правом положении
200	0,1	3,45	2,3	+6,7	
300	0,1	1,8	1,2	+1,6	
400	0,1	1,5	1,0	0	
600	0,1	1,5	1,0	0	
800	0,1	1,5	1,0	0	
1000	0,1	1,5	1,0	0	
2000	0,1	1,65	1,1	+0,9	
3000	0,1	1,86	1,24	+1,9	
4000	0,1	2,1	1,4	+3	
5000	0,1	2,67	1,78	+5	
6000	0,1	3,0	2,0	+6	
7000	0,1	3,0	2,0	+6	
8000	0,1	2,55	1,7	+4,6	

черкнуть характерные перегибы кривой, то масштаб по оси ординат берется крупным. Желательно выбрать масштаб таким, чтобы график был квадратным или имел пропорцию стандартного листа (10 : 7). В радиоэлектронике применяют линейный, полулогарифмический и логарифмический масштабы. При линейном масштабе по обеим осям откладывают равномерные деления, при полулогарифмическом — одна ось имеет линейный масштаб, а другая логарифмический, при логарифмическом масштабе — на обе оси откладывается логарифмическая шкала. Логарифмический масштаб очень удобен в тех случаях, когда необходимо «растянуть» отдельные участки графика.

Обычно нанесение логарифмического масштаба вызывает у радиолюбителей затруднения, а поэтому рассмотрим его построение. Пусть требуется (рис. 24) нанести шкалу частот в логарифмическом масштабе на отрезок OA, являющийся осью графика, причем частоты

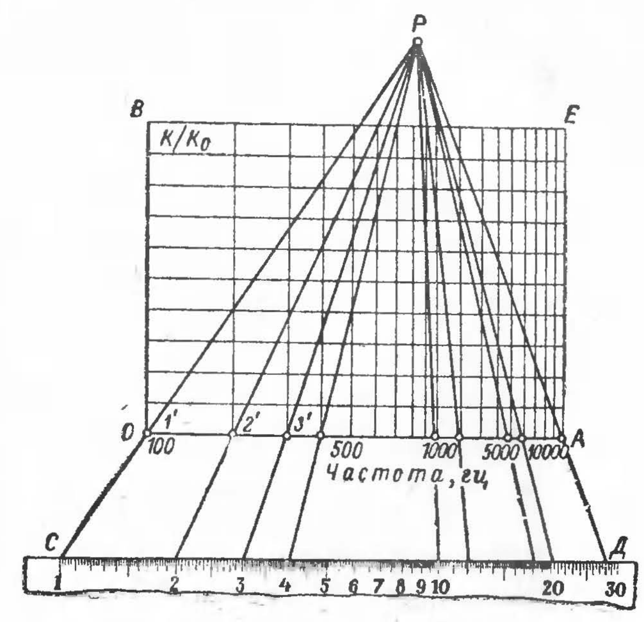


Рис. 24.

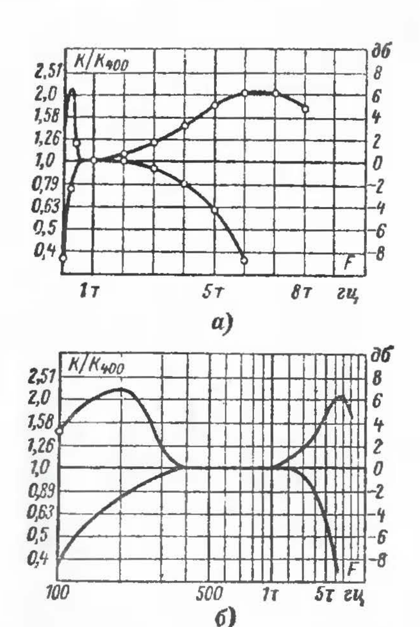


Рис 25.

от 100 до 1 000 *гц* должны быть нанесены через каждые 100 *гц*, а частоты от 1 000 до 10 000 *гц* через каждые 1 000 *гц*. Всего 19 точек. Проводим параллельно *OA* линию *CD* и с помощью движка логарифмической линейки разбиваем отрезок *CD* на 19 точек. Соединяем точки *C* и *O*, *A* и *D* и проводим прямые до пересечения в полюсе *P*. Поочередно соединяя линейкой точки *1*, *2*, *3*... с точкой *P*, отмечаем точки *1'*, *2'*, *3'*... на оси *OA*. Из точек *1'*, *2'*, *3'*... восстанавливаем перпендикуляры до пересечения с верхней границей графика *BE*. Если теперь нанести масштаб на ось *OB* и провести линии, параллельные оси *OA*, то получится координатная сетка. На рис. 24 ось *OB* имеет линейный масштаб.

Преимущества логарифмического масштаба наглядно видны из рис. 25, на котором построены одинаковые частотные характеристики, но в разных масштабах.

Задачи

4-1. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения, если $U_{изм}=124$ *в*, а $U_д=127$ *в*.

4-2. Составить таблицу поправок для вольтметра, если при сравнении его показаний с эталонным вольтметром получены следующие данные:

$U_{1\,изм}=0{,}8$ *в*,	$U_{1\,д}=1$ *в*;
$U_{2\,изм}=1{,}9$ *в*,	$U_{2\,д}=2$ *в*;
$U_{3\,изм}=4{,}1$ *в*,	$U_{3\,д}=4$ *в*;
$U_{4\,изм}=6{,}0$ *в*,	$U_{4\,д}=6{,}0$ *в*;
$U_{5\,изм}=8{,}0$ *в*,	$U_{5\,д}=8{,}1$ *в*;
$U_{6\,изм}=9{,}9$ *в*,	$U_{6\,д}=9{,}8$ *в*.

4-3. Прибором класса 2,5 на шкале 10 *в* измерено напряжение накала ламп $U_{изм}=6{,}35$ *в*. В каких пределах лежит действительное напряжение на лампах.

4-4. Каким прибором ТТ-1 или Ц-55 можно более точно измерить напряжение постоянного тока 9 *в*?
(ТТ-1, класс 2,5, шкалы 10—50—200—1 000 *в*;
Ц-55, класс 2,5, шкалы 0,075—3—7,5—30—150—300—600 *в*).

4-5. Каким прибором Ц-56 (класс 1,0 шкала 60 *в*) или Ц-57 (класс 1,5, шкала 30 *в*) можно более точно измерить напряжение постоянного тока 25 *в*?

4-6. Определить действительное значение и вероятное значение сопротивления, если в результате 10 измерений получены следующие данные: 680, 680, 675, 690, 685, 685, 695, 670, 685 *ом*. Поправка $\delta=-3$ *ом*.

4-7. Определить класс микроамперметра со шкалой 50 *мка*, если $\Delta I_{макс}=2$ *мка*.

4-8. Чем будут отличаться показания двух ламповых вольтметров с закрытым и открытым пиковыми детекторами при измерении несинусоидального напряжения (рис. 14, *в*).

4-9. Чем будут отличаться показания двух амплитудных вольтметров с закрытым и открытым входом при измерении несинусоидального напряжения (рис. 14, *е*)?

4-10. Выбрать масштаб и построить частотные характеристики УНЧ, если в процессе измерений получены следующие данные:

F, *гц*	300	400	1 000	2 000	3 000
$U_{вх}$, *в*	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$U_{вых}$, *в*	0,5	0,8	1,0	1,5	0,8

4-11. Построить амплитудную характеристику усилителя, если в результате измерений получены следующие данные:

$U_{вх}$, *в*	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{вых}$, *в*	1,0	2,0	4,0	5,6	6,0	5,0

и определить динамический диапазон усилителя.

4-12. Построить резонансную характеристику ФПЧ (из двух контуров), если при измерениях получены следующие данные:

($f_{пч}=465$ *кгц*, $U_{вх}=200$ *мкв*)

f, *кгц*	460	461	462	463	464	465
$U_{вых}$, *в*	0,02	0,04	0,7	1,2	0,8	1,0
f, *кгц*	466	467	468	469	470	
$U_{вых}$, *в*	1,1	0,9	0,5	0,02	0,01	

и произвести анализ результатов и настройки контуров ФПЧ.

4-13. По частотной характеристике (рис. 25, *б*) оценить работу регуляторов тембра УНЧ.

4-14. Построить график зависимости выходной мощности для УНЧ на транзисторах от напряжения питания, если в результате измерений получены следующие данные:

U, *в*	3,0	4,5	6,0	9,0	15,0
$P_{вых}$, *вт*	0,15	0,2	0,3	0,5	1,0

ОТВЕТЫ, УКАЗАНИЯ, РЕШЕНИЯ

К главе первой

1-1. Нихром. **1-2.** 33,6 *м* *. **1-3.** 61,6° С. **1-4.** Не допустим ($t_2=108{,}3°\,C>105°\,C$). **1-5.** $R_{12}=190$ *ом*, $R_{23}=76$ *ом*, $R_{31}=95$ *ом*. **1-6.** $R_1=11{,}4$ *ом*, $R_2=22{,}8$ *ом*, $R_3=5{,}7$ *ом*. **1-7.** Решение. Преобразуем схему (рис. 26, *а*).

Тогда по формулам (14)—(16)

$$R_A=\frac{(R_3+R_6)\,R_1}{R_3+R_6+R_1+R_4}=554{,}9\ ом,$$

* Здесь и далее все ответы даются с точностью не ниже ±0,1.

соответственно найдем R_B и R_C, $R_B=295{,}9$ *ом*, $R_C=328{,}8$ *ом*, тогда

$$R=R_A+\frac{(R_B+R_5+R_7)(R_C+R_2)}{R_B+R_5+R_7+R_C+R_2}=916{,}7\ ом.$$

1-8. $d=0{,}34$ *мм*. $N\approx 1\,100$ витков.

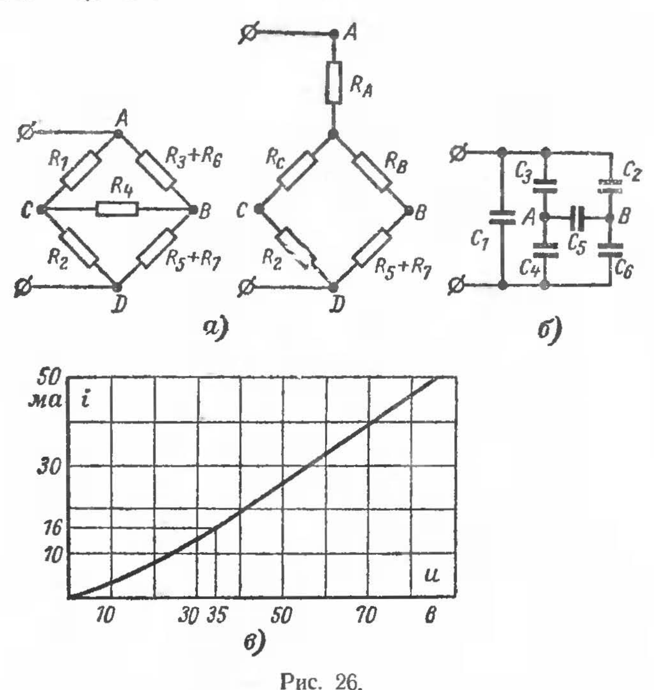


Рис. 26.

1-9. Р е ш е н и е. Найдем общее сопротивление цепи ($R=916{,}7$ *ом*, см. задачу 1-7)

$$R_{общ}=R+r_0=916{,}7+10=926{,}7\ ом;$$

$$I=\frac{E}{R_{общ}}=\frac{30}{926{,}7}\approx 0{,}032\ a.$$

Ток левой и правой ветвей (рис. 26, *а*) определим из отношения $\frac{R_C+R_2}{R_5+R_7+R_B}=\frac{I_1-I_{лев}}{I_{лев}}$; подставляя значения, получим:

$$I_{лев}=0{,}022\ a;$$

$$I_{прав}=I-I_{лев}=0{,}01\ a.$$

Найдем потенциалы точек:

$$\varphi_A=E-0{,}032\cdot 10=29{,}68\ в;$$

$$\varphi_B=850\cdot 0{,}01=8{,}5\ в;$$

$$\varphi_C=200\cdot 0{,}022=4{,}4\ в,$$

откуда

$$\varphi_{B-C}=8{,}5-4{,}4=4{,}1\ в,$$

тогда

$$I_4=\frac{4{,}1}{800}=0{,}0053\ a\ (\text{направлен от } B \text{ к } C).$$

Токи I_1, $I_3=I_6$ определим по первому закону Кирхгофа:

$$I_1=0{,}022-I_4=0{,}022-0{,}0053=0{,}0167\ a,$$

$$I_3=I_6=0{,}01+I_4=0{,}01+0{,}0053=0{,}0153\ a.$$

Мощности, рассеиваемые на каждом сопротивлении цепи, определим по формуле $P=I^2R$:

$$P_1=0{,}0167^2\cdot 1\,500=0{,}42\ вт;$$

$$P_2=0{,}022^2\cdot 200=0{,}1\ вт;$$

$$P_3=0{,}0153^2\cdot 150=0{,}036\ вт;$$

$$P_4=0{,}0053^2\cdot 800=0{,}022\ вт;$$

$$P_5=0{,}01^2\cdot 400=0{,}04\ вт;$$

$$P_6=0{,}0153^2\cdot 1\,200=0{,}29\ вт;$$

$$P_7=0{,}01^2\cdot 450=0{,}045\ вт.$$

1-10. $R_к=500$ ом, $P_к=0{,}018$ *вт*.

1-11. Р е ш е н и е $I_д=4\ I_э=4\cdot 2=8$ *ма*, тогда

$$I_1=I_д+I_э=8+2=10\ ма;$$

$$I_2=I_д=8\ ма;$$

$$R_2=\frac{60}{8\cdot 10^{-3}}=7\,500\ ом;$$

$$R_1=\frac{240-60}{10\cdot 10^{-3}}=18\,000\ ом;$$

$$P_{R1}=180\cdot 10\cdot 10^{-3}=1{,}8\ вт;$$

$$P_{R2}=60\cdot 8\cdot 10^{-3}=0{,}48\ вт.$$

1-12. $R_ф=27{,}5$ *ком*; $P_{Rф}=0{,}76$ *вт*. **1-13.** $R_ш=0{,}3$ *ом*.

1-14. Р е ш е н и е. Величина добавочного сопротивления может быть определена по формуле $R_д=\frac{1\,000\cdot U}{i_0}-r_0$, где i_0 — ток полного отклонения рамки, *ма*.

Тогда для R_3 и R_1 можно записать:

$$-\left\{\begin{array}{l} R_3\,i_0=1\,000\cdot U_3-i_0\,r_0 \\ R_1\,i_0=-1\,000\,U_1\pm i_0\,r_0 \end{array}\right.$$
$$\overline{i_0\,(R_3-R_1)=1\,000\,(U_3-U_1)},$$

откуда

$$i_0=\frac{1\,000\,(U_3-U_1)}{R_3-R_1}=\frac{1\,000\,(300-10)}{299\,650-9\,650}=1\ ма;$$

определим r_0:

$$r_0=\frac{1\,000\,U_1}{i_0}-R_1=\frac{1\,000\cdot 10}{1}-9\,650=350\ ом;$$

зная i_0 и r_0, найдем R_2:

$$R_2=\frac{1\,000\,U_2}{i_0}-r_0=\frac{1\,000\cdot 50}{1}-350=49\,650\ ом.$$

1-15. R_1=99 700 *ом*, R_2=499 700 *ом*, R_3=2 999 700 *ом*. **1-16.** R_3= =0,11 *ом*, R_2=1 *ом*, R_1=10 *ом*.

1-17. Указание. Принять $R_{вх}=2\,R_{вых}=200$ *ом*, тогда при $K=10$ имеем:

$$R_2=9R_3,\qquad R_1=\frac{10\,R_3}{9},\quad R_3=\frac{11\,R_{вых}}{10},\quad R_4=2R_1,$$

подставив значения, получим:

R_1 = 122,2 *ом*, R_2 = 990 *ом*, R_3 = 110 *ом*, R_4 = 244,4 *ом* (рис. 7).

1-18. Как известно, максимальная мощность в нагрузку передается при условии $r_0=R_н$. В нашем случае $r_0>R_{вх}$, а поэтому для согласования необходимо включить сопротивление R (рис. 7):

$$R=r_0-R_{вх}=300-200=100\ ом.$$

В этом случае напряжение на входе делителя будет равно $E_{ген}/2$.

1-19. $I_{r\,01}=0$, $I_1=1$ *а*, $I_2=0,75$ *а*, $I_3=0,25$ *а*, $I_4=I_{r\,02}=1$ *а*.

Все токи направлены на $+E_2$ против часовой стрелки:

P_1=1,5 *вт*, P_2=1,125 *вт*, P_3=0,375 *вт*, P_4=2 *вт* (рис. 8, *а*).

1-20. $I_1=I_{r\,01}=2,2$ *а*, $I_2=I_{r\,02}=0,5$ *а*, $I_3=0,5$ *а*, $I_4=2,2$ *а*. $I_{r\,02}$= =2,7 *а*, P_1=2,42 *вт*, P_2=0,5 *вт*, P_3=0,75 *вт*, P_4=9,68 *вт*.

1-21. Изобразим схему соединения конденсаторов, как указано на рис. 26, *б*. Так как все конденсаторы имеют одинаковую емкость, то потенциалы точек *A* и *B* равны, конденсатор C_5 не заряжается и на общую емкость батареи не влияет; тогда

$$C=C_1+\frac{C_3\,C_4}{C_3+C_4}+\frac{C_2\,C_6}{C_2+C_6}=2\ мкф.$$

$$U_{C1}=50\ в,\ U_{C2}=U_{C3}=U_{C4}=U_{C6}=25\ в,\ U_{C5}=0.$$

1-22. Решение.

$$\tau=RC=5\cdot10^{-3}\ сек=5\ мсек.$$

Так как $u=E/2$ (по условию задачи), то $E/2=E\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ или после несложных преобразований получим $e^{-\frac{t}{\tau}}=0,5$, по таблице (приложение 2) найдем, что $e^{-x}=0,5$ при $x=0,7$, тогда $t/\tau=0,7$, откуда

$$t=0,7\,\tau=0,7\cdot5=3,5\ мсек.$$

1-23. C=14 000 *пф*; **1-24.** I=16 *ма* (рис. 26, *в*). **1-25.** R_1=4 000 *ом*, R_2=500 *ом*; **1-26.** L=2,4 *гн*. **1-27.** I=17,3 *ма*. **1-28.** Указание. Ход решения аналогичен задаче 1-22. t=2 *мсек*.

К главе второй

2-1. T=0,02 *сек*, ω=314 *рад/сек*, U_m=310 *в*. **2-2.** I_m=0,3 *а*, I=0,212 *а*, f=143 *гц*, T=0,0071 *сек*. **2-3.** $f_1=10^5$ *гц*; f_2=1,85 *гц*, f_3=100 *гц*. **2-4.** I=0,127 *а*, $I_{ср}$=0,115 *а*. U=25,4 *в*, $U_{ср}$=22,9 *в*. **2-5.** I_m=0,113 *в*, $I_{ср}$=0,072 *а*, U_m=4,23 *в*, $U_{ср}$=2,7 *в*. **2-6.** 1,16 *ом*. **2-7.** В 2,6 раза. **2-8.** 94,2; 188; 282; 376 *ом* (рис. 27, *а*). **2-9.** 6 360, 3 180,

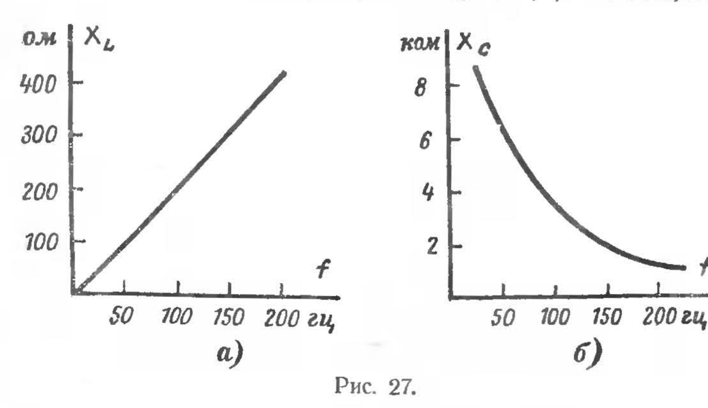


Рис. 27.

2 120, 1 590 *ом* (рис. 27, *б*). 2-10. Z_{500}=63 *ом*, $Z_{5\,000}$=628 *ом*. **2-11.** Z_{300}=53 *ком*.

2-12. Решение. Определим реактивные сопротивления катушки и конденсатора на частоте 30 *кгц*:

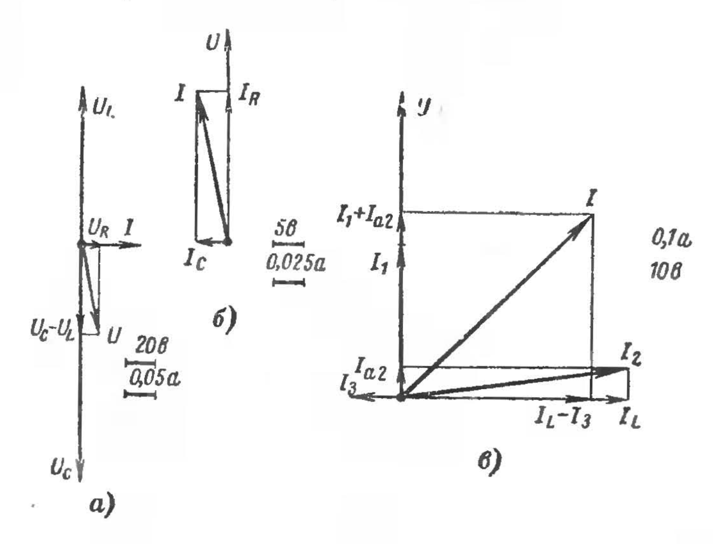


Рис. 28.

$$X_L = \omega L = 6{,}28 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 2\,260 \text{ ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{6{,}28 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 0{,}033 \cdot 10^{-6}} = 161 \text{ ом};$$

$$X = X_L - X_C = 2\,260 - 161 \cong 2\,100 \text{ ом};$$

$$Z = \sqrt{r^2 + X^2} = \sqrt{3^2 + 2\,100^2} \approx 2\,100 \text{ ом}.$$

2-13. $Z=750$ *ом*, $I=0{,}08$ *а* (рис. 28, *а*), $U_R=9{,}6$ *в*, $U_L=100{,}5$ *в*, $U_C=160$ *в*.

2-14. Ток через активное сопротивление $I_1=0{,}12$ *а*, ток через емкость $I_2=0{,}0226$ *а*, ток до разветвления $I=0{,}122$ *а*, $\cos\varphi=0{,}985$, $\sin\varphi=0{,}185$, $P=4{,}31$ *вт*, $Q=0{,}812$ *вар*, $S=4{,}39$ *ва* (рис. 28, *б*).

2-15. Указание. Расчет параллельной цепи рассмотрен на стр. 23 $I_1=0{,}5$ *а* (первая ветвь), $I_2=0{,}755$ *а* (вторая ветвь), $I_3=0{,}132$ *а* (третья ветвь), $P_a=60$ *вт*, $Q=62$ *вар*, $S\approx 85$ *ва* (рис. 28, *в*).

2-16. По формулам табл. на стр. 30 подсчитываем значения $U_0=7{,}65$ *в*, $U_{m4}=1{,}02$ *в*, $U_{m2}\approx 5{,}1$ *в*, $U_{m6}=0{,}436$ *в*.

2-17. Решение (см. табл. на стр. 30)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6{,}28}{0{,}00628} = 1\,000\ 1/сек;\quad I_0 = \frac{I_m}{\pi} = \frac{0{,}314}{3{,}14} = 0{,}1\ a;$$

$$I_{1m} = \frac{I_m}{2} = \frac{0{,}314}{2} = 0{,}157\ a;\quad I_{2m} = \frac{4I_m}{3\pi} = 0{,}132\ a;$$

$$I_{4m} = \frac{4\,I_m}{15\,\pi} = 0{,}0266\ a;\quad I_{6m} = \frac{4\,I_m}{35\,\pi} = 0{,}0114\ a;$$

$$i\,(t) = 0{,}1 + 0{,}157 \sin 1\,000\,t - 0{,}132 \cos 2\,000\,t -$$
$$- 0{,}0266 \cos 4\,000\,t - 0{,}0114 \cos 6\,000\,t - \ldots,\ a.$$

2-18. Указание. См. пример на стр. 29.

$u(t) = 21{,}92 \sin 314\,t + 7{,}86 \cos 314\,t - 8{,}32 \sin 942\,t$, *в*.

2-19. Указание. Кривая симметрична относительно оси ординат, а поэтому ряд будет иметь вид:

$$u\,(t) = U_0 + U''_{1m} \cos \omega t + U''_{2m} \cos 2\omega t + U''_{3m} \cos 3\omega t + \cdots,\ в.$$

Принимаем $n=12$, тогда $U_0=68{,}2$ *в*, $U''_{1m}=19{,}5$ *в*, $U''_{2m}=-23{,}4$ *в*, $U''_{3m}=16{,}5$ *в*.

По условию $f=800$ *гц*, тогда $\omega=2\pi f=1\,600$, окончательно ряд запишется:

$$u(t) = 68{,}2 + 19{,}5 \cos 1\,600\,\pi t - 23{,}4 \cos 3\,200\,\pi t +$$
$$+ 16{,}5 \cos 5\,400\,\pi t - \ldots,\ в.$$

2-20. $U=31{,}6$ *в*.

2-21. Указание. См. пример на стр. 23.

$Z_1 = 156$ *ом*, $I_{1m} = 0{,}16$ *а*, $Z_3 = 200$ *ом*; $I_{3m} = 0{,}03$ *а*; $I = 0{,}116$ *а*; $U = 18{,}2$ *в*; $P_a = 1{,}325$ *вт*.

2-22. Указание. По формуле табл. на стр. 30

$$U_{3m} = \frac{8U_m}{9\pi^2} = 1{,}78\ в,\quad U_{5m} = \frac{8U_m}{25\,\pi^2} = 0{,}64\ в,\quad f_3 = 2\,001\ гц,$$

$$f_5 = 3\,335\ гц.$$

2-23. $I_0=0{,}2$ *а*.

2-24. Несинусоидальное напряжение (рис. 16, *а*) содержит все составляющие ряда:

$$u\,(t) = U_0 + U'_{1m} \sin \omega t + U''_{1m} \cos \omega t + U'_{2m} \sin 2\omega t +$$
$$+ U''_{2m} \cos 2\omega t + U'_{3m} \sin 3\omega t + U''_{3m} \cos 3\omega t + \ldots,\ в.$$

Несинусоидальное напряжение (рис. 16, *б*) симметрично относительно оси ординат и синусных составляющих не содержит:

$$u\,(t) = U_0 + U''_{1m} \cos \omega t + U''_{2m} \cos 2\omega t + U''_{3m} \cos 3\omega t + \ldots,\ в.$$

2-25. $Q=77{,}5$. **2-26.** 800 *гц* **2-27.** 1,3 *гн*. **2-28.** 120 *ком*. **2-29.** 490 *мкгн*. **2-30.** 480—1 440 *кгц*.

2-31. Решение. Определим коэффициент перекрытия контура по частоте

$$K_f = \frac{1\,500}{520} = 2{,}9,$$

учитывая, что

$$K_f = \sqrt{\frac{C_{макс}}{C_{мин}}} = \sqrt{\frac{490 + C_x}{15 + C_x}},$$

где $C_x=C_м+C_{пар}$, имеем $2{,}9^2 = \dfrac{490 + C_x}{15 + C_x}$.

Решаем полученное уравнение относительно C_x:

$$C_x = 49\ пф,$$

тогда $C_м=49-10=39$ *пф*,

$$C_м = 39\ пф.$$

2-32. $L_ф=0{,}5$ *гн*, $C_ф=32$ *пф*, $C_0=16$ *пф*, **2-33.** $R=3{,}5$ *ком*, $C=460$ *пф*.

2-34. Указание. Из выражения (117) имеем:

$$L^2_{св} - K^2 L_1 L_{св} - K^2 L_1 L_2 = 0.$$

Подставляя значения и решая квадратное уравнение относительно $L_{св}$, получим $L_{св}\approx 2$ *мкгн* (отрицательный корень смысла не имеет).

2-35. $N_{св}=42$ витка. Указание: $L_{св}$ находится аналогично задаче 2-34:

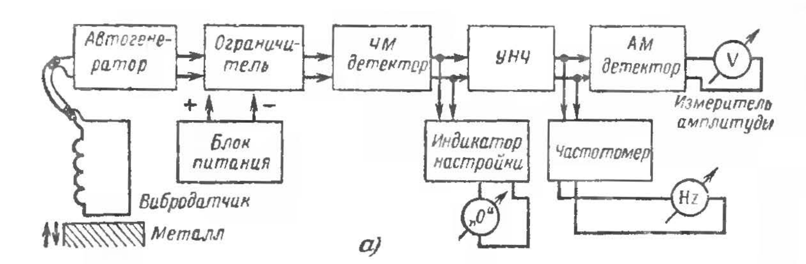
$$N_{св} \approx \frac{N_1 \sqrt{L_{св}}}{\sqrt{L_1}}.$$

2-36. $C_{св}=6\,435$ *пф*. **2-37.** Для одиночного контура $2\Delta f=3{,}6$ *кгц*. При критической связи $2\Delta f_{кр}=1{,}41 \cdot 3{,}6=5{,}1$ *кгц*. **2-38.** Максимальная полоса пропускания $2\Delta f_{макс}=3{,}1 \cdot 3{,}6=11{,}2$ *кгц* (рис. 8, *б*).

2-39. $f_2=525$ *кгц*, $f_1=645$ *кгц*, $p=0{,}33$. **2-40.** $f_1=460$ *кгц*, $f_2=745$ *кгц*, $p=0{,}615$. **2-41.** $p_{опт}=0{,}41$.

К главе третьей

3-1 *. Решение. Для бесконтактного измерения амплитуды и частоты вибрации наиболее приемлемым датчиком является катушка, индуктивность которой изменяется при приближении ее к вибрирующим металлическим деталям машин. Если такую катушку включить в контур автогенератора, то на выходе последнего получим частотно-



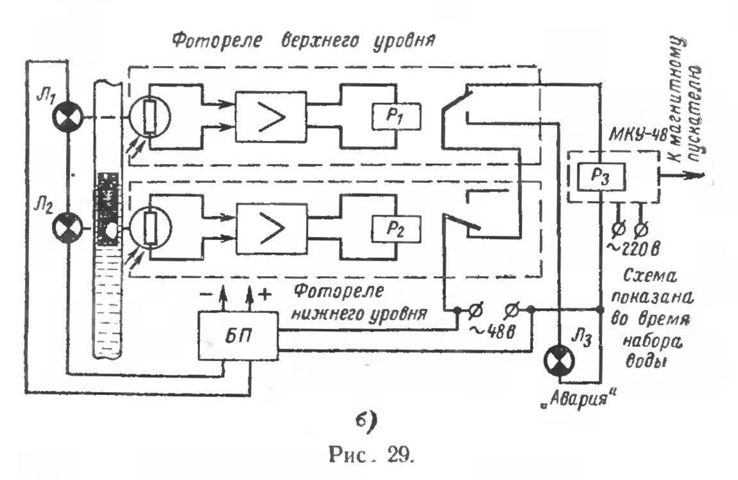


Рис. 29.

модулированные колебания. Девиация частоты будет пропорциональна амплитуде вибрации, а частота модуляции равна частоте вибрации. Для устранения паразитной амплитудной модуляции между автогенератором ЧМ и детектором включен ограничитель. Блок-схема прибора дана на рис. 29, *а*. Прибор выполнен на транзисторах. Индикаторы стрелочные. До разработки принципиальных электрических схем провести экспериментальную проверку возможности разбивки всего диапазона вибраций на поддиапазоны в целях повышения точности отсчета.

3-2. Рис. 29, *б*.

* В ответах к задачам 3-1—3-4 приводится один из возможных вариантов решения.

3-3. Рис. 30. Так как скорость измерения сравнительно невелика, в качестве коммутатора можно использовать шаговый искатель ШИ-25. Коммутатор имеет связь с усилителем для ступенчатого регулирования коэффициента усиления, что обеспечивает корректировку

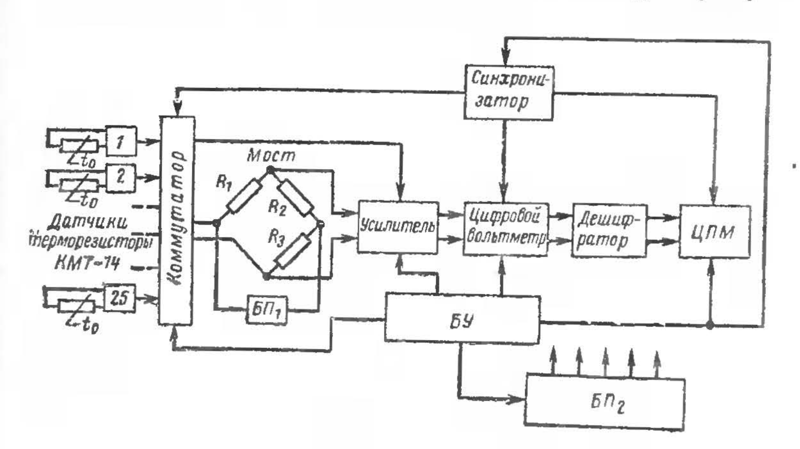


Рис. 30.

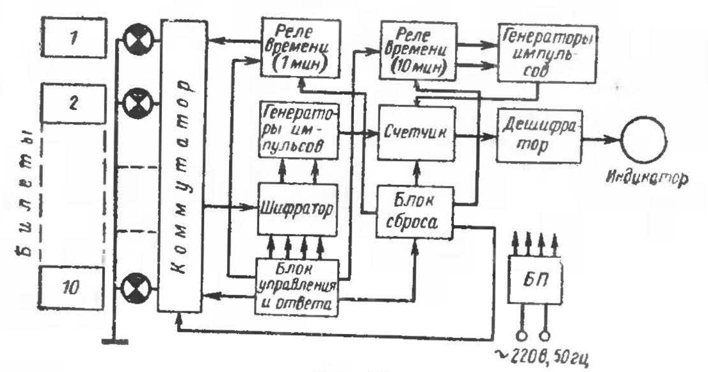


Рис. 31.

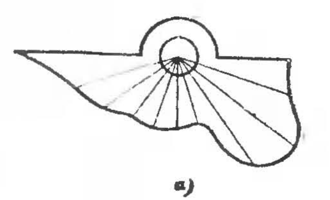


Рис. 32.

измерительного тракта в зависимости от чувствительности датчиков. Блок управления ($БУ$) предусматривает переход в ручной режим управления и режим калибровки. Блоки питания $БП_1$, $БП_2$.

3-4. Рис. 31.

3-5. См. рис. 32, *а*, *б*

а)

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔC_i, *пф*	20	8	6	3	3,5	2	2	14	15	10
R_i, *мм*	22,5	14,7	13	9,85	10,4	8,5	8,5	19,0	19,6	16,3

$R_{макс\,(10)}=19{,}5$ *мм*, $A=24$, $d=1$ *мм*, $r_0=5$ *мм*, $n=4$.

б)

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔC_i, *пф*	5	11	19	20	14	10	7	4	2	1
R_i, *мм*	13,2	18,8	24,4	25	21,5	18	15,3	12,1	9,2	7,4

$R_{макс\,(4)}=25$, $A=30$, $d=1{,}25$ *мм*, $r_0=5$ *мм*, $n=4$.

3-6. $L=1{,}52$ *мкгн*. **3-7.** Принимаем из конструктивных соображений $A_н=16$ *мм*, $A_{вн}=8$ *мм*, $N=4{,}8$ витка. **3-8.** Принимаем из конструктивных соображений $D_н=20$ *мм*, $D_{вн}=8$ *мм*, $N=11$ витков.

К главе четвертой

4-1. $\Delta A=-3$ *в*, $\gamma=-2{,}36\%$.

4-2. Таблица поправок составляется по значениям абсолютных погрешностей, взятых с обратным знаком.

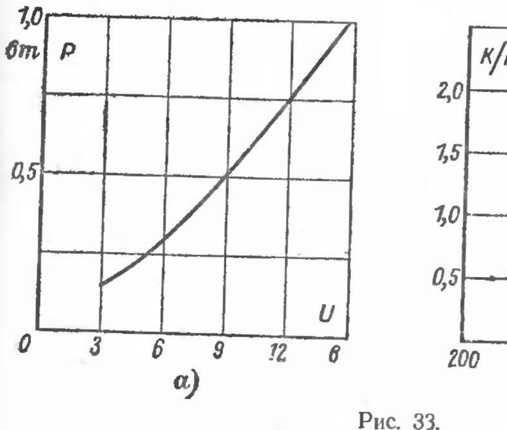
Измеряемое напряжение	до 1 *в*	1÷2 *в*	2÷4 *в*	4÷6 *в*	6÷8 *в*	8÷10 *в*
δ, *в*	+0,2	+0,1	+0,1	0	+0,1	—0,1

4-3. 6,10—6,6 *в*. **4-4.** ТТ-1, так как измерение производится на шкале 10 *в*. **4-5.** Ц-57.

4-6. Решение. Найдем $R_{ср}$:

$$R_{ср}=\frac{2\cdot680+675+690+3\cdot685+2\cdot670+695}{10}=681{,}5\ ом.$$

Вычислим остаточные погрешности: $\alpha_1=680-681{,}5=-1{,}5$ *ом*; $\alpha_2=-1{,}5$ *ом*; $\alpha_3=675-681{,}5=-6{,}5$ *ом*; $\alpha_4=690-681{,}5=+8{,}5$ *ом*; $\alpha_5=685-681{,}5=+3{,}5$ *ом*; $\alpha_6=+3{,}5$ *ом*; $\alpha_7=695-681{,}5=13{,}5$ *ом*; $\alpha_8=670-681{,}5=-11{,}5$ *ом*; $\alpha_9=-11{,}5$ *ом*; $\alpha_{10}=+3{,}5$ *ом*.



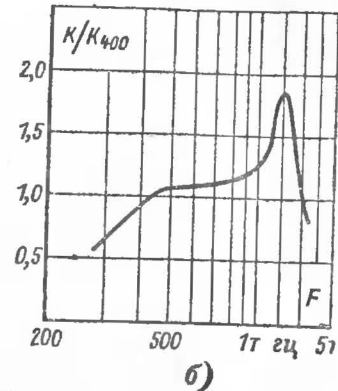


Рис. 33.

Определим среднюю квадратичную погрешность:

$$\sigma=\sqrt{\frac{2\cdot(-1{,}5)^2+(-6{,}5)^2+8{,}5^2+3(3{,}5)^2+(13{,}5)^2+2(-11{,}5)^2}{9}}=$$

$$=\sqrt{\frac{602{,}5}{9}}=8{,}2\ ом.$$

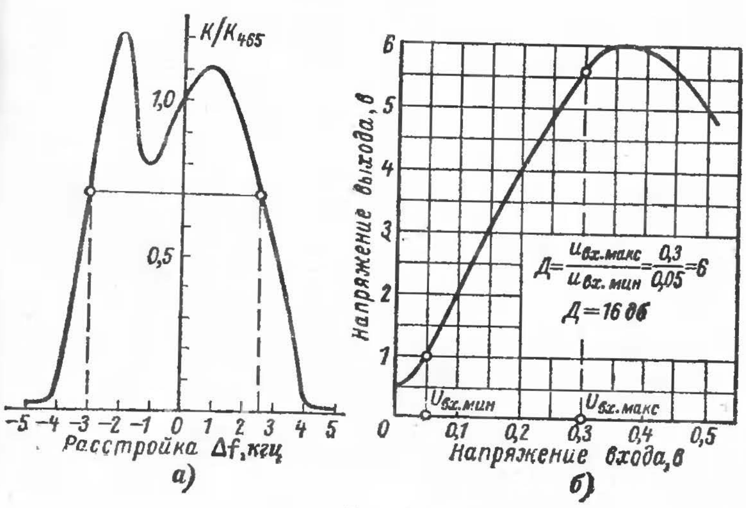


Рис. 34.

$$A_д = 681{,}5 - 3 \pm 3 \cdot 8{,}2 = 703 \cdot 1 \div 653{,}9 \text{ ом.}$$

$$A_в = 681{,}5 - 3 \pm \frac{2}{3} \cdot 8{,}2 = 684 \div 673{,}0 \text{ ом.}$$

4-7. 4,0. **4-8.** Принимаем, что шкалы вольтметров отградуированы в действующих значениях, тогда вольтметр с закрытым входом покажет $A_m/1{,}41$, а с открытым входом — $\frac{A_m + A_0}{1{,}41}$. **4-9**. Так как $A_0=0$, то при одинаковой градуировке шкал показания отличаться не будут. **4-10.** Рис. 33, *б*. **4-11.** Рис. 34, *б*. **4-12.** Рис. 34, *а*.

Δ *f*, *кгц*	—5	—4	—3	—2	—1	0	1	2	3	4	5
K/K_{465}	0,02	0,04	0,7	1,2	0,8	1	1,1	0,9	0,5	0,02	0,01

Неверно настроен ФПЧ, так как резонансная кривая несимметрична. При перестройке необходимо исключить влияние одного контура на другой. **4-13.** Регулятор тембра НЧ обеспечивает подъем частотной характеристики +7 *дб* и завал —8 *дб*, регулятор тембра ВЧ — подъем +7 *дб* и завал —8 *дб*. **4-14.** Рис. 33, *а*.

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых металлических проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ, *ом · мм²/м*	Температурный коэффициент сопротивления α, *1/град*
Алюминий	0,028	+0,004
Константан	0,5	+0,00002
Медь	0,0175	+0,004
Нихром	1,0	+0,00015

Предельная температура нагрева некоторых изолированных проводников

Марка проводника	Предельная температура нагрева, °С
ПЭВ-1, ПЭВ-2	100—105
ПЭЛ	70—85
ПБО, ПБД	50—60

Предельные допустимые рабочие напряжения для различных сопротивлений

Тип сопротивления	Номинальная мощность, *вт*	Предельно допустимое напряжение, *в*		Тип сопротивления	Номинальная мощность, *вт*	Предельно допустимое напряжение, *в*	
		непрерывный режим	импульсный режим			непрерывный режим	импульсный режим
ВС-0,25	0,25	350	750	МЛТ-2,0	2,0	750	1 200
ВС-0,5	0,5	500	1 000	УЛМ-0,12	0,12	100	
ВС-1,0	1,0	700	1 500	СП	—	400	800
ВС-2,0	2,0	1 000	2 000	СПО-0,15	0,15	100	—
МЛТ-0,85	0,25	250	500	СПО-0,5	0,5	250	—
МЛТ-0,5	0,5	350	700	СПО-1	1,0	350	—
МЛТ-1,0	1,0	500	1 000	СПО-2	2,0	600	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения показательной функции e^{-x} для x от 0 до 3,95

x	e^{-x}	*x*	e^{-x}	*x*	e^{-x}	*x*	e^{-x}
0,00	1,000	1,00	0,368	2,00	0,135	3,00	0,050
0,05	0,951	1,05	0,350	2,05	0,129	3,05	0,047
0,10	0,905	1,10	0,333	2,10	0,122	3,10	0,045
0 15	0,861	1,15	0,317	2,15	0,116	3,15	0,043
0,20	0,819	1,20	0,301	2,20	0,111	3,20	0,041
0,25	0,779	1,25	0,286	2,25	0,105	3,25	0,039
0,30	0,741	1,30	0,272	2,30	0,100	3,30	0,037

x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}	x	e^{-x}
0,35	0,705	1,35	0,259	2,35	0,095	3,35	0,035
0,40	0,670	1,40	0,247	2,40	0,091	3,40	0,033
0,45	0,638	1,45	0,235	2,45	0,086	3,45	0,032
0,50	0,607	1,50	0,223	2,50	0,082	3,50	0,030
0,55	0,577	1,55	0,212	2,55	0,078	3,55	0,029
0,60	0,549	1,60	0,202	2,60	0,074	3,60	0,027
0,65	0,522	1,65	0,192	2,65	0,071	3,65	0,026
0,70	0,497	1,70	0,183	2,70	0,067	3,70	0,025
0,75	0,472	1,75	0,173	2,75	0,064	3,75	0,023
0,80	0,449	1,80	0,165	2,80	0,061	3,80	0,022
0,85	0,427	1,85	0,157	2,85	0,058	3,85	0,021
0,90	0,407	1,90	0,150	2,90	0,055	3,90	0,020
0,95	0,387	1,95	0,142	2,95	0,052	3,95	0,019

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица тригонометрических функций

$x°$ ↓	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—	↓ $x°$	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—	↓ $x°$	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—
0	0,000		90	30	0,500	0,577	60	60	0,866	1,732	30
1	0,017	0,017	89	31	0,515	0,601	59	61	0,875	1,804	29
2	0,035	0,035	88	32	0,530	0,625	58	62	0,883	1,881	28
3	0,052	0,052	87	33	0,545	0,649	57	63	0,891	1,963	27
4	0,070	0,070	86	34	0,559	0,674	56	64	0,899	2,050	26
5	0,087	0,087	85	35	0,574	0,700	55	65	0,906	2,145	25
6	0,104	0,105	84	36	0,588	0,726	54	66	0,913	2,246	24
7	0,122	0,123	83	37	0,602	0,754	53	67	0,920	2,356	23
8	0,139	0,140	82	38	0,616	0,781	52	68	0,927	2,475	22
9	0,156	0,158	81	39	0,629	0,810	51	69	0,934	2,605	21
10	0,174	0,176	80	40	0,643	0,839	50	70	0,940	2,747	20
11	0,191	0,194	79	41	0,656	0,869	49	71	0,945	2,904	19
12	0,208	0,213	78	42	0,669	0,900	48	72	0,951	3,078	18
13	0,225	0,231	77	43	0,682	0,932	47	73	0,956	3,271	17
14	0,242	0,249	76	44	0,695	0,966	46	74	0,961	3,487	16
15	0,259	0,268	75	45	0,707	1,000	45	75	0,966	3,732	15
16	0,276	0,287	74	46	0,719	1,036	44	76	0,970	4,011	14
17	0,292	0,306	73	47	0,731	1,072	43	77	0,974	4,331	13
18	0,309	0,325	72	48	0,743	1,111	42	78	0,978	4,705	12
19	0,326	0,344	71	49	0,755	1,150	41	79	0,982	5,145	11
20	0,342	0,364	70	50	0,766	1,192	40	80	0,985	5,671	10

$x°$ ↓	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—	↓ $x°$	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—	↓ $x°$	$\sin x$	$\operatorname{tg} x$	—
21	0,359	0,384	69	51	0,777	1,235	39	81	0,988	6,314	9
22	0,375	0,404	68	52	0,778	1,280	38	82	0,990	7,115	8
23	0,391	0,424	67	53	0,799	1,327	37	83	0,992	8,144	7
24	0,407	0,445	66	54	0,809	1,376	36	84	0,994	8,514	6
25	0,423	0,466	65	55	0,819	1,428	35	85	0,996	11,430	5
26	0,438	0,488	64	56	0,829	1,483	34	86	0,997	14,301	4
27	0,454	0,509	63	57	0,839	1,540	33	87	0,998	19,081	3
28	0,469	0,532	62	58	0,848	1,600	32	88	0,999	28,636	2
29	0,485	0,554	61	59	0,857	1,664	31	89	0,999	57,290	1
30	0,500	0,577	60	60	0,866	1,732	30	90	1,000	—	0
—	$\cos x$	$\operatorname{ctg} x$	↑ $x°$	—	$\cos x$	$\operatorname{ctg} x$	↑ $x°$	—	$\cos x$	$\operatorname{ctg} x$	↑ $x°$

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л. А., Теоретические основы электротехники, ч. 1, изд. 4-е, изд-во «Высшая школа», 1964.

2. Мучник А. Я., Парфенов К. А., Общая электротехника, изд. 3-е, изд-во «Высшая школа», 1967.

3. Изюмов Н. М., Линде Д. П., Основы радиотехники, МРБ, изд. 2-е, изд-во «Энергия», 1965.

4. Вайнштейн С. С. и Конашинский Д. А., Задачи и примеры для радиолюбителей, МРБ, вып. 112, изд-во «Энергия», 1951.

5. Хесин А. Я., Импульсная техника, МРБ, изд-во «Энергия», 1965.

6. Волгов В. А., Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Энергия», 1967.

7. Луцкий В. А., Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры, изд. 2-е, изд-во «Наукова думка», 1966.

8. Меерсон А. М., Радиоизмерительная техника, МРБ, изд-во «Энергия», 1967.

9. Мирский Г. Я., Радиоэлектронные измерения, Госэнергоиздат, 1963.

PAVEL 49

Соколов Сергей Николаевич

Задачи для радиолюбителей

Редактор *Б. А. Снедков*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Технический редактор *Г. Г. Самсонова*

Корректор *Г. Г. Желтова*

Сдано в набор 4/IV 1969 г. Подписано к печати 8/IX 1969 г. Т-11514
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 3,78
Уч.-изд. л. 4,07 Тираж 50 000 экз. Цена 17 коп. Зак. № 616.

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.